

Einfluss von Anbau- und Pflegemaßnahmen auf die
Hexenbesenkrankheit (*Crinipellis pernicios*a (Stahel) Singer) bei Ka-
kaoklonen im Siedlungsgebiet Alto Beni – Bolivien

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum agriculturarum

(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Ing. agr. Joachim Milz

geboren am 18.9.1956 in Berlin

Präsident

der Humboldt-Universität zu Berlin

Professor Dr. Christoph Marksches

Dekan

der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Professor Dr. Otto Kaufmann

Promotionskommission

Vorsitzender: Professor Dr. Kurt-Johannes Peters

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. habil Manuela Zude (vormals Professor Dr. Peter Lüd-
ders, HU-Berlin)

2. Professor Dr. Andreas Bürkert, Universität Kassel

3. Professor Dr. Reinhard Lieberei, Universität Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2006

Vorwort

Die Beschäftigung mit der Kakaokultur begann für mich mit einem Auslandspraktikum in Kolumbien 1980 während meines ersten Studiums an der Gesamthochschule Kassel in Witzenhausen. Nach Abschluss des Studiums begann ich als Entwicklungshelfer des Deutschen Entwicklungsdienstes DED, als Berater im landwirtschaftlichen Ausbildungsprogramm der Kakaogenossenschaft „EL CEIBO“ in Bolivien zu arbeiten. Es sollten Kontrollmöglichkeiten für die Hexenbesenkrankheit in Kakaopflanzungen gesucht werden, die gegen Ende der 1970er Jahre in der gesamten Region die Kakaokproduktion fast zum Erliegen gebracht hatte. Auf Studienreisen zu bedeutenden Kakaoforschungsinstituten in Kolumbien und Brasilien versuchte ich, unsere Beratungsarbeit dem neuesten Stand der Forschung anzupassen. Nach fast fünfjähriger Tätigkeit in Bolivien kehrte ich nach Deutschland zurück und begann an der Technischen Universität zu Berlin den Diplomstudiengang der Internationalen Agrarwissenschaften. Im Januar 1990, nach Abschluss der Hauptdiplomprüfungen reiste ich erneut als Entwicklungshelfer des DED nach Bolivien aus. Während meiner Tätigkeit dort, führte ich auf meinem eigenen Betrieb die Untersuchungen zur Epidemiologie des Hexenbesens durch. Die Auswertung der ersten Ergebnisse war im Rahmen der Diplomarbeit erfolgt, die ich 1993 abschloss. Gleich im Anschluss daran begann ich, die Untersuchungen für die Erstellung der Dissertation fortzuführen.

Als Fachberater des DED war ich ab 1993 zuständig für den Aufbau eines „Amazonasprogramms“, an dem mehrere Entwicklungshelfer und bolivianische Institutionen beteiligt waren. Damit erweiterte sich auch meine Aufgabenstellung, die nun die Suche nach *nachhaltigen landwirtschaftlichen Anbauformen* in dieser fragilen Ökoregion in den Vordergrund rückte. Während einer externen Evaluierung des DED-Programms in der Region im Jahr 1995 wurde Ernst GÖTSCH als Agroforstexperte eingeladen. Seine Schlussfolgerungen und Empfehlungen führten zu einer grundlegenden Neuorientierung unseres Verständnisses von Ökosystemen und vermittelten uns konkrete praktische Hinweise zum Aufbau sukzessionaler Agroforstpflanzungen. Die Umgestaltung meiner eigenen Versuchspflanzung führte zu einer deutlichen Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und zur Verringerung phytosanitärer Probleme einschließlich der des Hexenbesenbefalls. Nach Beendigung meiner Tätigkeit als Entwicklungshelfer 1997 weitete ich die begonnen Arbeiten mit sukzessionalen Agroforstsystemen auf meinem Betrieb aus und begann verstärkt diese Erfahrungen in Form freiberuflicher Beratungstätigkeit mit Kleinbauern umzusetzen.

Die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse während meiner beruflichen Tätigkeit haben den Inhalt und die Form der vorliegenden Dissertation entscheidend geprägt.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Lüdders, ohne dessen langjährige Motivation und Unterstützung diese Arbeit niemals zustande gekommen wäre. Er betreute die Endfassung noch vom Krankenbett aus. Herr Prof. Dr. Lüdders verstarb im Januar 2006.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern von EL CEIBO bedanken, insbesondere bei Herrn Dionicio Vaquiata, der mich während des gesamten Zeitraumes bei der Datenerfassung zuverlässig unterstützt hat und bei Herrn Germán Trujillo, der mir fachlich zur Seite stand. Einen weiteren Dank gilt Frau Monika Huber, der Beauftragten des Deutschen Entwicklungsdienstes in Bolivien während meiner Zeit als Entwicklungshelfer, die es mir ermöglicht hatte, erste Erfahrungen mit sukzessionalen Agroforstsystemen in Brasilien kennenzulernen und umzusetzen.

Zu allergrößtem Dank bin ich Ernst Götsch verpflichtet, der mir seine Erkenntnisse und Erfahrungen in der praktischen Anwendung der Prinzipien sukzessionaler Agroforstsysteme vermittelt hat und mir bis heute freundschaftlich in allen Fragen zur Seite steht.

Ohne das Vertrauen des Franziskanerpriesters Roberto Eckerstorfer wäre es mir nicht möglich gewesen, im Rahmen meiner Beratungsarbeit des Projektes O.S.C.A.R. im Alto Beni, zusammen mit vielen Siedlern der Region, den Agroforstansatz für die Anbaupraxis weiterzuentwickeln. Ihm und den Technikern des Projektes AGRO-O.S.C.A.R. möchte ich ebenfalls meinen Dank ausdrücken.

Letztendlich getragen wurde diese Arbeit auch von meiner Frau Sandra, die während meiner monatelangen Abwesenheit von der Familie es auf sich genommen hat, sich alleine um unsere Kinder Miriam, Joachim, Johannes und Jonas zu kümmern, sowie durch ihren Einsatz beim Aufbau des Betriebes in Bolivien. Ein herzliches Dankeschön für die vielfältige Unterstützung auf beiden Seiten des Ozeans gebühren meiner Mutter, die mir bei der Überarbeitung und Korrektur der Arbeit beigestanden hat und meiner Schwiegermutter, die sich in unserer Abwesenheit um die Verwaltung des landwirtschaftlichen Betriebes kümmerte.

Vorwort	II
Danksagung.....	IV
1 Einführung zur Problembeschreibung und Zielsetzung	1
2 Aspekte des Kakaoanbaues	5
2.1 Die Entwicklung der Kakaoproduktion weltweit.....	5
2.1.1 Anbau und wirtschaftliche Bedeutung	6
2.1.2 Botanik	7
2.1.3 Standortansprüche	8
2.2 Die Hexenbesenkrankheit (<i>Crinipellis perniciosa</i>).....	10
2.2.1 Biologie	11
2.2.2 Symptomatologie	11
2.2.3 Krankheitsentwicklung und Befallsverlauf.....	14
2.2.4 Einfluss von Umweltfaktoren.....	19
2.2.5 Maßnahmen des Pflanzenschutzes	22
2.2.6 Ökonomische Aspekte zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit	30
3 Eigene Untersuchungen	32
3.1 Das Siedlungsgebiet Alto Beni	32
3.1.1 Böden	33
3.1.2 Klima.....	34
3.1.3 Landnutzung.....	35
3.1.4 Soziokulturelle Aspekte	36
3.1.5 Anbau und Erträge von Kakao im Untersuchungsgebiet Alto Beni	37
3.2 Material und Methoden der Datenerhebung.....	39
3.2.1 Beschreibung der Experimentalpflanzungen	39
3.2.2 Versuchsanordnung.....	44
3.2.3 Untersuchungen zum Entwicklungszyklus des Kakaobaumes und der Hexenbesenkrankheit (Bereich A)	45
3.2.4 Untersuchungen an fünf verschiedenen Kakaoklonen auf Hexenbesentoleranz und auf Ertragsentwicklung (Bereich B, Standort Sapecho).....	48
3.2.5 Beschreibung der Klone	49
3.2.6 Methoden der statistischen Auswertung	53
3.3 Ergebnisse	54
3.3.1 Klimadaten	54

3.3.2	Entwicklungszyklus des Kakaobaumes	57
3.3.3	Entwicklungszyklus der Hexenbesenkrankheit.....	59
3.3.4	Anfälligkeit der Klone auf Hexenbesenbefall.....	72
3.3.5	Einfluss von Schnittmaßnahmen auf Hexenbesenbefall	74
3.3.6	Einfluss von Schnittmaßnahmen auf den Ertrag	75
4	Diskussion der Untersuchungsergebnisse im Kontext internationaler	
	Hexenbesenforschung	79
4.1	Das „International Witches’ Broom Project“ (IWBP)	79
4.2	Epidemiologie des Hexenbesens.....	81
4.2.1	Einfluss der Witterung auf die Fruchtkörperbildung von Hexenbesen.....	81
4.2.2	Phänologie des Kakaobaumes und Hexenbeseninfektionen	83
4.3	Vergleich der Klone auf Hexenbesenbefall und Ertragsentwicklung	88
4.3.1	Anfälligkeit gegenüber Hexenbeseninfektionen	88
4.3.2	Vergleich der Klone auf ihr Ertragsverhalten	89
4.4	Wirksamkeit von Kontroll- und Pflegemaßnahmen.....	91
4.4.1	Feldversuch I: Befallsgradienten von Hexenbeseninfektionen an Kakaosetzlingen in Relation des Abstandes zur Infektionsquelle (ANDEBRHAN et al., 1993)	92
4.4.2	Feldversuch II: Untersuchungen zur Wirksamkeit phytosanitärer Kontrollmaßnahmen in Form von Baumschnitt (MADDISON et al., 1993).....	95
4.5	Empfehlungen zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit	99
4.6	Beispiele für Agroforstsysteme mit Kakao	103
5	Zusammenfassende Betrachtung und Ausblick	108
6	Zusammenfassung.....	111
	Abbildungsverzeichnis.....	117
	Tabellenverzeichnis	120
	Literaturverzeichnis.....	122
	Eidesstattliche Erklärung	133

Abkürzungen

AOPEB	Asociación de Organizaciones de Productores Ecológicos de Bolivia
NN	Normal Null
C/N	Kohlenstoff-Stickstoff Verhältniss
CATIE	Centro Agronómico de Tecnología y Enseñanza
CEPLAC	Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira
DED	Deutscher Entwicklungsdienst
El CEIBO	Name der Zentralgenossenschaft von Kakaoproduzenten in Bolivien
FAO	Food and Agriculture Organisation
FIBL	Forschungsinstitut für Biologischen Landbau
GTZ	Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
Ha	Hektar
IBTA	Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
ICCO	International Cocoa Organization
INC	Instituto Nacional de Colonización
INE	Instituto Nacional de Estadística
IWBP	International Witches' Broom Projekt
K	Kelvin
SAFS	Sukzessionale Agroforstsysteme

1 Einführung zur Problembeschreibung und Zielsetzung

Der Kakaoanbau erfolgte über Jahrhunderte hinweg in tropischen Waldgebieten, ohne dass dies zunächst ersichtliche Auswirkungen auf das komplexe Ökosystem Regenwald gehabt hätte. Aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach Kakao auf dem Weltmarkt wurde der Anbau während des 20ten Jahrhunderts stark ausgeweitet. Zur Erschließung von Anbauflächen rodetet man neue Waldgebiete oder pflanzte Kakao in ausgelichteten Primärwald. Somit trug der Kakaoanbau neben der Holzgewinnung, der Weidnutzung zur Rinderhaltung und dem Bergbau in bedeutender Weise zur Ausbeutung und Vernichtung von Tropenwald bei (MILZ, 2002; RUF & ZADI, 1998). Mit der Ausweitung des Kakaoanbaus nahmen Probleme phytosanitärer Art in dieser Kultur weltweit zu. In Lateinamerika ist vor allem der Hexenbesenpilz *Crinipellis pernicioso* zu benennen, in Afrika die durch ein Virus hervorgerufene sog. Sprossschwellerkrankung (swollen shoot) und in Asien der Pilz *Oncobasidium theobromae*, Verursacher der „Vascular Streak Dieback“ Krankheit sowie der Kakaoschädling „Cocoa pod borer“ *Conopomorpha Crammerella* (CHOK, 1998; PESTICIDE ACTION NETWORK UK, 2001). In vielen Anbaugebieten konnte aufgrund der phytosanitären Probleme trotz großer technischer Anstrengungen die Kakaoproduktion nicht mehr wirtschaftlich aufrechterhalten werden. In Kapitel 2.1 wird die weltweite Entwicklung des Kakaoanbaus beschrieben.

In Bolivien wurden nach der Revolution von 1952 und der anschließenden Agrarreform von 1953 staatliche Programme zur Agrarkolonisation des östlichen Andenrandes sowie des Tieflandes entwickelt (INC, 1985; ELBERS, 2002). Deren Ziel war es, die Landwirtschaft des Landes durch die Einführung neuer Produkte wie Kaffee (*Coffea arabica*), Kakao (*Theobroma cacao*), Zitrusfrüchten (*Citrus spp.*), Zuckerrohr (*Saccharum officinalis*), Reis (*Oryza sativa*) u.a.m. zu diversifizieren und wenig erschlossene Landesteile zu besiedeln. Ferner sollte durch diese Maßnahmen arbeitslosen Stadtbewohnern und Minenarbeitern sowie landlosen Bauern des dichtbesiedelten Altiplano eine Lebens- und Arbeitsgrundlage geboten werden.

Anfang der 1960er Jahre förderte die bolivianische Regierung zur Besiedlung der Region Alto Beni in besonderer Weise den Anbau von Kakao. Dies erfolgte durch staatlich unterstützte Entwicklungsprogramme in Form von technischer Beratung, dem Aufbau einer Saatgutstation mit eingeführten Kakaoklonen zur Produktion von Hybridsaatgut sowie zinslosen Darlehen für die Neusiedler.

Die Einführung des Kakaoanbaues hatte sich anfänglich als problemlos erwiesen. Das Auspflanzen erfolgte in die durch Brandrodung vorbereiteten Felder zusammen mit der Aussaat von Trockenreis. Als Schattenbäume dienten *Erythrina spp.* und *Inga spp.* in einer Dichte

von 25 bis 30 Bäumen/ha. Viele Pflanzungen wiesen jedoch kaum eine permanente Beschattung auf. Obgleich keine nennenswerten Pflegemaßnahmen in den Kakaopflanzungen durchgeführt wurden, konnte ein Ertragsniveau von 450 bis 900 kg/ha erzielt werden. Lediglich vor der Erntetätigkeit wurde eine Beikrautregulierung vorgenommen¹.

Gegen Ende der 1970er Jahre kam es zu einem massiven Krankheitsbefall durch Hexenbesen (*Crinipellis pernicioso*) mit z. T. 100 %-igen Ernteaussfällen. Als Ursache dafür wurde der Zusammenbruch der Resistenz des aus Ekuador stammenden und als resistent gegenüber Hexenbesen geltendem Klon Scavina 6 (SCA 6) angesehen, der in dieser Zeit in vielen Kakaobaugebieten Lateinamerikas maßgeblich für die Hybridsaatproduktion eingesetzt worden war². Aus Ekuador wurde bereits seit längerer Zeit von Hexenbesenbefall des Klones SCA 6 berichtet (PORRAS & SANCHEZ, 1991). Verschiedene staatliche Programme zur Kontrolle der Krankheit hatten nicht den erwarteten Erfolg. Die Produktionskosten verteuerten sich durch die notwendigen Pflegemaßnahmen zur Kontrolle der Krankheit derartig, dass eine rentable Aufrechterhaltung älterer und hochwüchsiger Pflanzungen oft nicht mehr gegeben war. Der Zusammenbruch der Weltmarktpreise für Kakao Ende der 1980er Jahre führte in vielen kakaoproduzierenden Ländern zu einer drastischen Reduzierung des Anbaues. Für eine große Anzahl von Kleinbauern bedeuteten die phytosanitären Probleme in Verbindung mit niedrigen Erzeugerpreisen die Bedrohung ihrer Existenz. Die Hexenbesenkrankheit wird in Kapitel 2.2 an Hand internationaler wissenschaftlicher Veröffentlichungen ausführlich beschrieben.

Über die Zentralgenossenschaft „EL CEIBO“ konnte in der Region Alto Beni durch zertifizierten ökologischen Kakaobau und damit verbunden den Einstieg in den internationalen Biomarkt ein relativ hohes Preisniveau gehalten werden. Dies erlaubte es, kostenintensive regelmäßige Pflegearbeiten in Form von Baumschnitten durchzuführen. Der Hexenbesenbefall in Kakaopflanzungen konnte dadurch zwar innerhalb weniger Jahre verringert werden, das anfängliche Ertragsniveau wurde aber nur noch in Ausnahmefällen erzielt. Auch durch den zertifizierten ökologischen Anbau und konsequent durchgeführter phytosanitärer Pflegemaßnahmen wurde das Problem der Hexenbesenkrankheit nicht gelöst. In Kapitel 3.1 werden der Kakaobau im Alto Beni und die Entwicklung der Kakaoproduktion in Bezug zur Hexenbesenkrankheit dargestellt.

Erste Untersuchungen zur Epidemiologie des Hexenbesenpilzes in der Region Alto Beni wurden im Rahmen meiner Diplomarbeit (MILZ, 1993) zwischen 1990 und 1992 durchgeführt

¹ Datenerhebung im Rahmen meiner Beratungstätigkeit von 1982 bis 1987 in der Zentralgenossenschaft EL CEIBO.

² Persönliche Mitteilungen des Kakaotechnikers German Trujillo, der von 1973 bis 1987 die staatliche Saatgutstation für Hybridkakao des Instituto Boliviano Agropecuario IBTA in Sapecho-Alto Beni geleitet hatte.

und darauf aufbauend Empfehlungen zur Kontrolle durch Baumschnittmaßnahmen formuliert. Zum besseren Verständnis des Krankheitsverlaufs wurden die Untersuchungen zur Epidemiologie von Hexenbesen im Rahmen der vorliegenden Arbeit an zwei unterschiedlichen Standorten weitergeführt. Zugrunde lag die Beobachtung, dass Kakaopflanzungen in höher gelegenen Regionen weniger anfällig für Hexenbeseninfektionen waren als die in der Talebene. Die Untersuchungen zur Epidemiologie der Hexenbesenkrankheit an beiden Standorten wurden durch die Erhebung phänologischer Parameter des Kakaobaumes wie Blüten-, Frucht- und Triebwachstum ergänzt und in Zusammenhang zu den ebenfalls erhobenen Klimadaten gestellt. Der Versuchsaufbau und die Ergebnisse werden in Kapitel 3.2 dargestellt.

Hexenbesen hat eine zeitlich differenzierte vegetative und generative Phase, die von den jeweiligen Witterungsbedingungen abhängig ist. Viele international durchgeführte Forschungen hatten daher vor allem Untersuchungen zum Reproduktionszyklus des Hexenbesenpilzes sowie die Suche nach Bekämpfungsstrategien zum Ziel. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 4 beschrieben und in Zusammenhang mit den eigenen Untersuchungen kritisch erörtert.

Die vielen bisher nur mit mäßigem Erfolg durchgeführten Maßnahmen zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit in den betroffenen Ländern Lateinamerikas zeigten deutlich, dass nur ein besseres Verständnis der Interaktionen zwischen Witterung, Inokulum und Phänologie der Wirtspflanze es ermöglichen würde, effiziente und ökonomisch vertretbare Kontroll- und Bekämpfungsprogramme zu entwickeln. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für die Region Alto Beni diese Interaktionen zu untersuchen, die Ergebnisse kritisch zu beleuchten und alternative Anbauformen für eine ökologisch angepasste und ökonomisch rentable Kakaoproduktion vorzuschlagen.

Noch während der Felduntersuchungen habe ich, angeregt durch Empfehlungen des Agroforstexperten E. GÖTSCH, auf meinem eigenen Betrieb in der Region verschiedene Kakao-Bananen- und Orangenpflanzungen in dynamische Agroforstsysteme umgestaltet. Parallel dazu begann ich auch mit Kleinbauern, entsprechende Agroforstsysteme zu erproben. Im Gegensatz zu den Schlussfolgerungen, formuliert in der Diplomarbeit (MILZ, 1993), durch Baumschnittarbeiten die Hexenbesenkrankheit kontrollieren zu können, ist im Rahmen der Untersuchungen zu dieser Dissertation deutlich geworden, dass die vielschichtigen phytosanitären Probleme im kommerziellen Kakaoanbau nicht ohne weiteres durch kausale Wirkungs-Ursachen-Zusammenhänge erklärt und gelöst werden können. Durch intensive Beschäftigung mit unterschiedlichsten Agroforstsystemen hat sich meine Sichtweise seit Beginn der Datenerfassung für die hier vorliegende Arbeit erheblich erweitert. Die praktischen Erfahrungen im Anbau und der Beratung von Kleinbauern sowie die Beobachtungen der Entwicklung der untersuchten Kakaopflanzung nach der Umwandlung von einer „konventionellen“ Kakaopflan-

zung mit einigen wenigen Schattenbäumen hin zu einer diversifizierten und komplexen Agroforstpflanzung werden kurz beschreiben, Anbaubeispiele werden in Kapitel 4.6 dargestellt.

Die sich aus dieser Arbeit ergebenden Erkenntnisse zur Funktions- und Wirkungsweise von Krankheiten und Schädlingen unter Berücksichtigung eigener Beobachtungen und Erfahrungen im Anbau und in der Beratung sukzessionaler Agroforstsysteme führen zu Empfehlungen, die nicht mehr ausschließlich die Bekämpfung des Hexenbesens in den Vordergrund stellen. In Kapitel 4.5 wird darauf Bezug genommen und es werden Empfehlungen für den Kakaoanbau formuliert und ein Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf gegeben.

2 Aspekte des Kakaoanbaues

Um in die umfassende Thematik einzuführen, wird zunächst ein Überblick über die Entwicklung des Kakaoanbaus und seine ökonomische Bedeutung auf internationaler Ebene gegeben. Weiterhin werden die Botanik, die Standortansprüche der Kakaokultur sowie die Hexenbesenkrankheit und deren Kontrollmöglichkeiten beschrieben.

2.1 Die Entwicklung der Kakaoproduktion weltweit

Schon in der Zeit der Maya (1000 v. Chr.) wurde Kakao in Mittelamerika (Yukatan) kultiviert, wo die Bohnen auch als Währung Bedeutung hatten. Gegen Ende des 16. Jahrhunderts wurde Kakao ein populäres Getränk in der spanischen gehobenen Gesellschaft und bald breitete sich der Konsum auch auf andere europäische Staaten aus (TOXOPEUS & LEMS, 1989).

Der Beginn der industriellen Verarbeitung ist durch das Jahr 1815 gekennzeichnet, in dem der holländische Kaufmann VAN HOUTEN die erste windgetriebene Schokoladenmühle baute und später die erste Fabrik zur Herstellung von Kakaopulver und Kakaobutter betrieb. Im Zuge der Kolonisierung des afrikanischen Kontinentes wurde der Kakao in Westafrika eingeführt und erlangte dort bald eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung (TOXOPEUS & LEMS, 1989).

Kakao ist heute weltweit eine der bedeutendsten Baumkulturen, die durch stetige Änderungen der Anbauggebiete von einem Land zum anderen geprägt ist. So fand im 16. Jahrhundert eine Verschiebung der Anbauggebiete von Mexiko nach Zentralamerika statt. Im 17. Jahrhundert erfolgte der Anbau vorwiegend auf den karibischen Inseln, von wo aus er im 18. Jahrhundert nach Venezuela verlagert wurde und dann weiter nach Ekuador und Sao Tomé im 19. Jahrhundert. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts schließlich waren die wichtigsten kakaoproduzierenden Länder Brasilien, Ghana und Nigeria, gefolgt von dem Staat Elfenbeinküste. Während die afrikanischen Kakaoanbauggebiete heute noch von Bedeutung sind, ist der Anbau in Brasilien aufgrund der Hexenbesenkrankheit stark zurückgegangen. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erfolgte eine starke Ausweitung des Anbaus in Asien, wobei Malaysia den kürzesten Zyklus von Anbauexpansion bis zum Zusammenbruch der Produktion in der Kakaoanbaugeschichte zu verzeichnen hatte. Asien besitzt jedoch weiterhin ein großes Potential für Kakaoanbau, vornehmlich in Ländern wie Indonesien und Vietnam (RUF & ZADI, 1998). Auch bei anderen tropischen Baumkulturen gab es in der Vergangenheit massive Verlagerungen der Anbauzentren. Als Beispiel sei hier der Gummianbau (*Hevea brasiliensis*) vom Amazonasgebiet nach Asien, die Ölpalmenproduktion (*Elaeis guineensis*) von Afrika nach

Asien und der Kaffeeanbau (*Coffea arabica*) von Afrika nach Südamerika zu erwähnen. Einer der Gründe für dieses Phänomen wird in Zusammenhang von Migrationsbewegungen sowie der Degradierung von Böden im Zuge der Rodung tropischer Wälder gesehen (RUF & ZADI, 1998).

2.1.1 Anbau und wirtschaftliche Bedeutung

Kakao ist für viele Länder der Tropen und Subtropen ein wichtiges Exportprodukt. Die größten Kakaoproduzenten sind die Elfenbeinküste, Brasilien, Ghana, Malaysia, Nigeria, Kamerun, Ekuador und Indonesien (Tab. 2.1). Die Weltproduktion ist von 1.550.000 t im Jahr 1975 auf 2.400.000 t in den Jahren 1988/89 angestiegen (MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT 1990) und überschritt im Erntejahr 2002/2003 die 3-Millionen-Grenze (ICCO, 2002/03).

Bolivien hat mit geschätzten 2000 t Jahresproduktion einen verschwindend kleinen Anteil am Weltmarkt für Kakao. In der Region Alto Beni ist dieser jedoch ein bedeutender Wirtschaftsfaktor. Sinkende Weltmarktpreise haben in den letzten Jahren in vielen Ländern zu Diversifizierungsbestrebungen ihrer Exportproduktion geführt.

Tab. 2.1: Entwicklung der Produktionsmengen der wichtigsten kakaoproduzierenden Länder (in 1000 t) von 1974/75 bis 2001/02 (Gill & Duffus. Previsions Commodity Information, Inc. 2001; Icco, 2002/03)

Anbauregion	1974/75	1989/90	2001/02
Brasilien	273	368	124
Ekuador	78	85	81
Kamerun	118	115	131
Ghana	377	300	341
Elfenbeinküste	242	750	1265
Nigeria	214	160	185
Malaysia	13	255	25
Indonesien	-	-	455
Andere	234	406	254
Gesamt	1.549	2.439	2.861

Die Überalterung vieler Kakaopflanzungen in Afrika und Brasilien führten zu einer Abnahme der Flächenerträge, die jedoch durch Erweiterung der Anbauflächen noch teilweise ausgeglichen werden, so dass die Kakaoproduktion weltweit weiterhin ansteigt. Hinzu kamen neue, wichtige Produktionsländer wie Malaysia und Indonesien, die bereits bedeutende Mengen Kakao für den Weltmarkt produzieren (MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT, 1990; ICCO, 2002/03).

Die wichtigsten Anbauggebiete

Afrika

Afrika ist mit einem Anteil der Weltkakaoproduktion von 68,2 % der wichtigste Kakao-produzent (ICCO, 2002/03). Die größten Produktionszuwächse während der letzten Jahrzehnte verzeichnet die Elfenbeinküste. Die Produktion der übrigen afrikanischen Länder ist weitestgehend konstant geblieben. Die Konzentration der Hälfte der Weltjahresproduktion auf die Elfenbeinküste führt in politischen Krisensituationen zu hohen Preisfluktuationen auf dem Weltmarkt.

Lateinamerika

Lateinamerika spielt heute nicht mehr die Rolle auf dem Weltkakaomarkt wie noch vor einigen Jahrzehnten. Während die Produktion in den meisten lateinamerikanischen Ländern keine großen Schwankungen aufweist, ist der vormals zweitgrößte Kakaoproduzent der Welt, Brasilien, weit zurückgefallen. Innerhalb der letzten 10 Jahre ist die Jahresproduktion von 368.000 t auf 124.000 t (2002/03) gesunken. Dies ist vor allem auf das Auftreten der Hexenbesenkrankheit im Bundesstaat Bahia zurückzuführen.

Asien

Während vor 25 Jahren Asien noch keine Rolle im Weltkakaomarkt spielte, wurden dort in den Jahren 2001/2002 knapp 20 % der Weltjahresproduktion erzeugt. Malaysia hat jedoch seine enormen Produktionszuwächse, die es zu Beginn der 90er Jahre erreichte, nicht aufrechterhalten können. Indonesien ist mit einer Produktion von 455.000 t in den Jahren 2002/03 dagegen zum zweitgrößten Kakaoproduzenten der Welt aufgestiegen.

2.1.2 Botanik

Theobroma cacao L. gehört zur Familie der *Sterculiaceae* und ist die ökonomisch wichtigste Art der Gattung *Theobroma*. Andere verwandte Arten wie *Theobroma grandiflora* haben im Laufe des letzten Jahrzehnts in Brasilien und Bolivien zur Pulpegewinnung stark an wirtschaftlicher Bedeutung gewonnen; *Theobroma bicolor* ist nur in einigen Gebieten der Amazonasregion von Interesse. Andere Arten sind wirtschaftlich bedeutungslos.

Nach zunächst aufrechtem Wachstum verzweigt sich die junge Pflanze und bildet in der Regel zwischen 3 und 5 Hauptäste (*Jorquette*), die fächerförmig angeordnete Seitenzweige hervorbringen. Unter- und oberhalb der Jorquetten entwickeln sich neue Adventivsprosse (*Chupons*) in jeder beliebigen Höhe, die nach einiger Zeit ebenfalls Jorquetten bilden können.

Nach etwa 10 Jahren erreicht die Pflanze bei ungestörtem Wachstum und unter Schatten eine maximale Höhe von 8 m. Der Hauptstamm und die Chupons wachsen orthotrop (aufrecht), die Fächerzweige zeigen ein plagiotropes (schräg nach oben gerichtetes) Wachstum (TOXOPEUS & LEMS, 1989).

Die Blütenstände erscheinen in alten Blattachseln am Stamm (*Kauliflorie*) und an den Ästen (*Ramiflorie*). Sie besitzen eine zymöse Verzweigung nach Art eines Dichasiums, d.h. nicht der Haupttrieb sondern jeweils zwei Seitenachsen der Infloreszenz setzen das Wachstum fort und bauen den Blütenstand auf. Blüten können sich während des ganzen Jahres bilden. Die Beerenfrüchte, nur etwa 3 bis 5 % der Blüten werden befruchtet, entwickeln sich in 5 bis 6 Monaten aus Blüten, die zu Beginn der Regenzeit angelegt und durch kleine Insekten (*Forcipomyia spp.*) bestäubt werden. Die Früchte variieren in Form und Farbe und werden etwa 10 bis 30 cm lang. Im Inneren sitzen, zu fünf Reihen um eine Mittelspindel herum angeordnet, etwa 20 bis 45 Samen von je 2 bis 4 cm Länge und 1 bis 2 cm Breite, die von einem bei der Reife aromatisch schmeckendem hellen Fruchtmus (*Pulpe*) umgeben sind (TOXOPEUS & LEMS, 1989).

2.1.3 Standortansprüche

Niederschläge

Kakao kommt bei gleichmäßiger Niederschlagsverteilung (100 mm/Monat) mit 1.250 mm/Jahr aus. Kürzere Trockenperioden können durch starke Bewölkung und hohe Luftfeuchte kompensiert werden. Als monatlicher absoluter Mindestniederschlag werden von ZEBALLOS (1970) 60 mm angegeben.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Der Kakao findet optimale Wachstumsbedingungen in den Gebieten zwischen 10° nördlicher und südlicher Breite wird aber kommerziell bis zum 20. Breitengrad angebaut. Die Mindestwärmeansprüche werden nach ZEBALLOS (1970) wie folgt angegeben:

- Jahresdurchschnittstemperatur 21 °C,
- durchschnittliche Tiefsttemperatur 15 °C,
- absolute Tiefsttemperatur 10 °C,
- täglich höchster Schwankungsbereich: 9 °K.

Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit sollte 80 % nicht unterschreiten.

Strahlung und Wind

Als schattenliebende Kultur wird in Kakaopflanzungen empfohlen, die direkte Sonneneinstrahlung durch das Pflanzen von Schattenbäumen zu regulieren, um günstige mikroklimatische Bedingungen für ein normales Pflanzenwachstum zu schaffen. In Regionen mit starkem Wind ist zusätzlich für Windschutzmaßnahmen zu sorgen.

Nährstoffversorgung und Düngung

Kakao wächst auf den verschiedensten Böden. Auf sandigen Böden ist es wichtig, die Wasserhaltefähigkeit zu verbessern, schwere Böden mit Staunässe müssen drainiert werden.

Tab. 2.2: Jährlicher Nährstoffentzug des Bodens in kg bei 1000 kg/ha Ernteertrag (TOXOPEUS & LEMS, 1989)

Fruchtbestandteil	N [kg]	P [kg]	K [kg]
Samen	23,2	6,0	19,6
Schalen	19,6	2,0	44,5
Gesamt ³	42,8	8,0	64,1

Tab. 2.2 gibt den Nährstoffentzug bezogen auf die Fruchtbestandteile und Tab. 2.3 den Nährstoffentzug bezogen auf 1000 kg Erntemenge an.

Tab. 2.3: Nährstoffentzug bezogen auf 1000 kg Ernte (WOOD, 1973)

	N[kg]	P[kg]	K[kg]
Ernte (1000 kg Samen)	20	4	10

Die Gründigkeit des Standortes sollte mindestens 1,5 m betragen. Der pH-Wert kann zwischen 4 und 7,5 liegen, das Optimum beträgt 6,5. Für hohe Ertragsleistung kommen nur die besten Böden in Frage. Im Intensivanbau ohne Beschattung muss zusätzlich gedüngt werden (TOXOPEUS & LEMS, 1989).

³ Das Verhältnis zwischen Schale und frischem Samen beträgt ca. 5 : 1 und ist von Sorte und Witterung abhängig

2.2 Die Hexenbesenkrankheit (*Crinipellis perniciosa*)

Die Hexenbesenkrankheit ist im gesamten Amazonasgebiet anzutreffen weiterhin in Grenada, Guayana, St. Lucia, St. Vincent, Panama, Surinam, Trinidad und Venezuela. Der Anteil der von Hexenbesen betroffenen Länder an der weltweiten Kakaoproduktion betrug 1992 fast 21 %. Ernteverluste von bis zu 95 % im brasilianischen Amazonasgebiet sowie in Bahia (ANON, 1992) verdeutlichen die ökonomische Bedeutsamkeit dieser Kakaokrankheit, wie auch aus Tab. 2.4 zu ersehen ist. Hexenbesen führt nach Schwarzfäule (*Phytophthora palmivora*) weltweit zu den größten Ernteverlusten, obwohl sie bisher nur auf dem lateinamerikanischen Kontinent auftritt.

Tab. 2.4: Geschätzte jährliche Ernteverluste, verursacht durch die wichtigsten Kakaokrankheiten (BOWER et.al., 2001)

Krankheit	Pathogen	Region	Ernteverluste	
			T (in 1000)	\$ US (Million ⁴)
Schwarzfäule	Phytophthora spp.	Afrika/Lateinamerika/Asien	450	423
Hexenbesen	Crinipellis perniciosa	Lateinamerika	250	235
Monilia	Moniliophthora roreri	Lateinamerika	30	47
Swollen Shoot	CSSV	Afrika	50	28
Vascular-streak dieback	Oncobasidium theobromae	Asien	30	28

Die Hexenbesenkrankheit ist für viele Kakaoanbauggebiete Latein- und Zentralamerikas eine der bedeutendsten Krankheiten und aufgrund ihres komplizierten Reproduktionszyklus nur schwer zu bekämpfen. Erstmals wurden 1895 in Surinam Hexenbeseninfektionen in kommerziellen Kakaopflanzungen registriert. Während im brasilianischen Amazonasgebiet die Hexenbesenkrankheit bereits endemisch war, wurden erst 1989 Hexenbeseninfektionen im Bundesstaat Bahia identifiziert, dem bis dahin größten Kakaoanbauggebiet Lateinamerikas (BOWERS et al., 2001; WHEELER, 1987).

⁴ Die Berechnung der monetären Ernteverluste erfolgt nach Weltmarktpreisen von Januar 2001: Wert = \$ US 940.00 metric ton⁻¹.

In folgenden Ausführungen wird ein Überblick über den augenblicklichen Stand der internationalen Hexenbesenpilzforschung gegeben.

2.2.1 Biologie

Crinipellis perniciosa gehört zur Abteilung der Eumycota, Unterabteilung Basidiomycotina, Klasse Hymenomycetes, Unterklasse Holobasidiomycetidae, Ordnung Agaricales und Gattung *Marasmius* (vormals *Marasmius perniciosus*).

Unterabteilung Basidiomycotina

Basidiomyceten (*Basidiomycotina*) stellen die höchstentwickelte Gruppe der Pilze dar und sind charakterisiert durch die Bildung einer Basidie mit meist vier Basidiosporen. Die Fruchtkörper der höheren Basidiomyceten werden durch gewebeartiges Mycel (tertiäres Mycel) aufgebaut. Die *dikaryotische* Phase bleibt in weiten Teilen des Lebenszyklus erhalten. Die Fruchtkörper sind vielgestaltig, von krustenartigen Belägen bis zu holzigen Konsolen oder fleischigen Ständern. Viele Basidiomyceten bilden keine Geschlechtsorgane; nur Rostpilze entwickeln Spermatien und Empfängnishyphen. Die Vermehrung erfolgt asexuell durch Sprossung, Kondidienbildung, Entwicklung von Arthrosporen (Zerbrechen von Hyphen in einzelne Zellen) oder Oidien (abgeschnürte Zellen an Hyphenspitzen), die mitunter als Spermatien dienen (HOFFMANN et al., 1984).

Gattung Marasmius

Crinipellis perniciosa (vormals *Marasmius perniciosus*)

Crinipellis befällt außer der Gattung *Theobroma* noch Bäume der Gattung *Herrania*. BASTOS & Evans (1985) beschreiben *Crinipellis*-Befall von Anatto (*Bixa orellana*) sowie *Solanum rugosum* und *Solanum lasiantherum*, die typische Krankheits Symptome aufweisen. Mit von *Solanum* stammenden *Crinipellis*sporen infizierte Tomaten und Paprikapflanzen entwickelten Symptome wie Schwellungen, Verzweigungen, deformierte Früchte und Nekrosen. Es handelt sich dabei anscheinend um Pathotypen von *Crinipellis perniciosa*, die an Kakaopflanzen jedoch keine Befallssymptome hervorrufen.

2.2.2 Symptomatologie

Die durch Basidien gebildeten sexuellen Sporen (Basidiosporen) haben die Fähigkeit, jedes sich in aktivem Wachstum befindende Gewebe (meristematisch) von Kakaopflanzen zu infi-

zieren und eine Vielzahl von Symptomen hervorzurufen. Die Symptomausprägung ist dabei abhängig von der Kakaovarietät, der Art des infizierten Gewebes sowie dem Entwicklungsstadium, in dem sich Letzteres befindet.

Symptome von Hexenbesen an jungen Trieben



Abb. 2.1 Symptome von Hexenbesen an Trieben

Der typische Hexenbesentrieb an Kakaobäumen entsteht durch Infektion einer Terminal- oder Seitentrieb-knospe. Der infizierte Trieb weist nach dem Austreiben ein gedrungenes und leicht gebogenes Wachstum mit zahlreichen besenartigen Verzweigungen und verkürzten Internodien auf, was zu der charakteristischen Symptomausbildung und der Krankheitsbezeichnung „Hexenbesen“ geführt hat (Abb. 2.1). Die Blattoberfläche bleibt meist unverändert, Blattstiel und Pulvinus sind häufig angeschwollen und die Blätter bleiben klein, vor allem, die im Bereich der Triebspitze. Vigorose Kakaotriebe

können der Infektion „davonwachsen“ und es entstehen dann so genannte durchgewachsene „laterale Hexenbesentriebe“. Sie können bis zu 1 m Länge erreichen.

Symptome von Hexenbesen an Blütenständen



Abb. 2.2: Symptome von Hexenbesen an Blüten

Eine Infektion der Blütenpolster führt gelegentlich zur Bildung von beblätterten Trieben, ähnlich denen der oben beschriebenen, jedoch mit weniger Seitenknospen. Eine Infektion von Blüten im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium entwickelt meist keine sichtbaren Symptome. Von einer Initialinfektion ausgehend, wird dann das Blütenpolstergewebe befallen und erst mit einem neuen Blütenwachstumsschub tritt der volle Umfang der Infektion zutage. Sie bleibt dabei solange latent, bis das meristematische Gewebe aktiv wird. Der Befall führt zu einer abnormalen Blütenbildung, den so genannten „star

blooms‘. Die einzelnen Blüten sind länger als normal und der Blütenstil ist verdickt, so dass die Blüten einen aufrechten, nach oben gerichteten Wuchs aufweisen (Abb. 2.2). Infizierte Blüten verbleiben überdurchschnittlich lange hängen, während der normale Blütenfall bei nicht erfolgter Befruchtung nach 3 Tagen eintritt (THOROLD, 1975).

Symptome an Früchten



Abb. 2.3: Hexenbesenbefall an junger Kakao-
frucht

Kakaofrüchte können indirekt durch den Eintritt von Hyphen über den Blütenstil in die Frucht infiziert werden. Diese schwillt dann an und die Bildung der Samenanlagen wird unterbunden. Bedingt durch Hypertrophie der Fruchtschale nimmt sie ein erdbeerähnliches Aussehen an und erreicht kaum mehr als 6 cm Länge. Später stirbt sie ab, verfärbt sich schwarz und verhärtet.

Erfolgt die Infektion nach der Befruchtung und an Früchten bis ca. 1 cm Länge (*cherelles*), kommt es zu der typischen karottenförmigen Verformung. Diese Früchte können noch eine Länge von 12–15 cm erreichen, bevor sie trocknen und hart werden (Abb. 2.3). Infektionen der 2–5 cm großen Beeren verursachen einseitige Verdickungen, die Früchte erreichen aber

ihre Endgröße. Das Abreifen erfolgt dabei unregelmäßig und der Inhalt ist kompakt, wässrig und vollkommen nekrotisiert. Die Samen sind zerstört. Erfolgt die Infektion nach Erreichen der Endgröße, bleibt es meist bei lokalen Verfärbungen der Fruchtschale, ohne dass die Samen beeinträchtigt werden. Mit einem Alter von 3–4 Monaten werden Kakaofrüchte als immun gegenüber einer Infektion angesehen (EVANS, 1981; ANDEBRHAN, 1981b; 1982).

Die leicht sichtbaren Symptome an Trieben und Blüten führen oft zu einer Unterschätzung von möglichen Fruchtfektionen, die dann mit *Phytophthora palmivora* oder der *Moniliafäule* verwechselt werden. Der Hexenbesenpilz ist nicht nur in der Lage, weiches Gewebe zu durchdringen, sondern kann durch Verletzung der Rinde freigelegtes Kambiumgewebe penetrieren, was zu einer anormalen Kallusbildung führt. Befinden sich Knospen in nächster Nähe solcher infizierter Stellen, kann es auch zur Triebausildung kommen. Von *C. pernicio-*

sa befallenes Pflanzengewebe stirbt ab, trocknet aus und ist prinzipiell befähigt, Fruchtkörper und somit Sporen zu bilden (EVANS, 1981).

2.2.3 Krankheitsentwicklung und Befallsverlauf

Infektionsprozess

Der Infektionsprozess beginnt mit der Keimung von Sporen auf infektiösem Pflanzenmaterial. In der Regel wird nach Wasseraufnahme und Aktivierung von Enzymen ein Keimschlauch gebildet, der zu einer Hyphe auswächst. Die Sporen werden an gut sichtbaren Fruchtkörpern gebildet, deren Färbung von cremefarben über rosa bis dunkelrot reicht. Im Zentrum ist ein rot-schwarzer Punkt sichtbar. Der Hutkörper ist radial gefurcht, der Durchmesser reicht von weniger als 1 bis zu über 25 mm. Die Lamellen sind weiß, relativ dick und können eine Breite von 1–2 mm erreichen.

Die Basidien sind $31\text{--}32 \times 7\text{--}9 \mu$ groß. Die Freisetzung der Sporen erfolgt bei Hexenbesen passiv während der kühleren Nachtstunden. Die Zeitangaben zur maximalen Sporulation schwanken je nach Autor zwischen 17 Uhr und Sonnenaufgang (THORWORLD, 1975), 24 und 4 Uhr (ANDEBRHAN, 1987) und den frühen Morgenstunden (EVANS, 1981). Übereinstimmend wird die Notwendigkeit einer hohen Luftfeuchtigkeit von über 80 % angegeben sowie kühlere Temperaturen, da die Sporen empfindlich auf Dehydrierung reagieren und schnell ihre Keimfähigkeit verlieren. Nach EVANS (1981) überleben Sporen die direkte Sonneneinstrahlung nicht länger als eine Stunde.



Abb. 2.4a/b: Fruchtkörper an Hexenbesen

Die Keimung erfolgt in Wasser oder in wasserdampfgesättigter Atmosphäre innerhalb von 2 Stunden und ist nach 4 Stunden abgeschlossen. Licht scheint keinen Einfluss auf die Sporenkeimung zu haben.

Nach der Keimung und der Entwicklung von Mycelium auf der Epidermis erfolgt die Penetration in das Wirtsgewebe durch Stomata oder direkt. Der Vorgang der Sporenkeimung und die Penetration in das Wirtsgewebe erfordert weniger als sechs Stunden (SREENIVASAN, 1989). Die Verbreitung der Sporen geschieht durch Wind und Wasser. ARAGUNDI et al. (1987) konnten in ihren Untersuchungen die Verbreitung von Sporen durch Wind bis auf eine Entfernung von 285 m nachweisen. Möglichkeiten der Sporenverbreitung über Entfernungen von 50–70 km sollen möglich sein, wie von Untersuchungen aus Ekuador berichtet wird (EVANS & SOLORZANO, 1982). ANDERBRAHN (1987) hat die Bedeutung des Wassers als Vehikel für Sporen, vor allem für Infektionen von Blütenanlagen, untersucht. Es besteht eine signifikante Korrelation zwischen der Anzahl von infizierten Blütenpolstern und der Anzahl von Hexenbeseninfektionen in der Krone eines Baumes. Bei starker Triebinfektion gelangen Sporen aus dem Kronenbereich des Baumes über das Vehikel Wasser an die Blütenpolster der Äste und des Stammes und infizieren diese. Der Befall von Trieben ist nach den Untersuchungen der oben genannten Autoren hauptsächlich auf Infektionsquellen außerhalb des Baumes zurückzuführen, während die Infektion von Blütenanlagen zu 70 bis 80 % von Inokulum⁵ innerhalb des Baumes stammen.

Besiedlung des Wirtsgewebes

Die Besiedlung des Wirtsgewebes ist nach dem Entwicklungszyklus des Pathogens zu differenzieren. Zwei Myceliumformen, die sich morphologisch, physiologisch und genetisch unterscheiden, werden während des Lebenszyklus des Hexenbesenpilzes gebildet:

Das monokaryotische Primärmycel ist charakteristisch geschwollen und flexibel und breitet sich ausschließlich interzellulär im parenchymatischen Gewebe des lebenden Wirtes aus. Eine systemische Verbreitung des Erregers über mehr oder weniger weite Teile der Pflanze findet nicht statt.

Das dikaryotische Sekundärmycel besteht aus dünnen, gleichmäßigen, baumwollähnlichen Hyphen mit Schnallenbildung und charakterisiert die saprophytische Phase der Entwicklung, die mit dem Absterben des infizierten Gewebes beginnt. Die Ausbreitung erfolgt sowohl inter- als auch intrazellulär.

⁵ Unter Inokulum versteht man Vermehrungseinheiten von Krankheitserregern, die, wenn sie mit ihrem Wirt zusammentreffen, eine Infektion verursachen – sofern es die Umweltbedingungen gestatten (HOFFMANN et al., 1985)

Keines der unterschiedlichen Hexenbesenmycelien kann Neuinfektionen hervorrufen (EVANS, 1980).

Vegetative Phase

Die vegetative Phase entspricht dem parasitären Verlauf der Hexenbesenkrankheit. Erste Symptome an Kakaotrieben treten 4 bis 5 Wochen nach Infektion auf. Dies ist allerdings abhängig von aktivem Zellwachstum, da Infektionen über mehrere Monate latent vorhanden sein können, ohne dass es zur Symptomausprägung kommt.

Es wird angenommen, dass eine oder mehrere Hemmstoffe, die nur in jungem Kakao-gewebe vorkommen, die Dikaryotisierung verzögern oder unterbinden und dadurch die pathogene Phase des Pilzes auslösen. Schwache oder ältere Kalluskulturen verhindern entweder eine Sporenkeimung oder sind nicht in der Lage, die Dikaryotisierung zu unterdrücken. Dies gibt Hinweise darauf, dass diese Hemmstoffe nur in genügend hoher Konzentration in sich aktivem Wachstum befindendem Gewebe gebildet werden können und gibt eine Erklärung für das Auftreten von Symptomen ausschließlich an meristematischem Pflanzengewebe.

Die parasitäre Phase des Pilzes dauert in infizierten Trieben 5–12 Wochen und in Kakao-früchten 12–16 Wochen. Danach beginnt das Absterben (Nekrose) der Zellen und die saprophytische Mycelbildung schreitet rasch voran. Daraus ist zu schließen, dass die Konzentration der angenommenen Hemmstoffe mit dem Ausreifen von Trieben und Früchten abnimmt, es zur Dikaryotisierung mit anschließendem intrazellulären Mycelwachstum kommt und die Wirtszellen absterben (EVANS, 1980).

BASTOS & ANDEBRHAN (1980) haben bei Untersuchungen über die Präsenz von Gibberelinen in Basidiosporen festgestellt, dass Extrakte von Basidiosporen Wachstumsveränderungen bei Reispflanzen hervorrufen, die denen nach Anwendung von Gibberelinsäure sehr ähnlich waren. An Kakaopflanzen wurde ebenfalls ein Hyperwachstum der Triebspitze mit der Bildung von anormalen Blättern beobachtet. Vergleichende chromatografische Untersuchungen des Sporenextraktes mit Gibberelinsäure führten zu ähnlichen Ergebnissen und es ist daher möglich, dass auch Gibbereline bei den Wachstumsveränderungen des Pflanzengewebes eine Rolle spielen.

Die Auswirkung des Befalls von *Crinipellis* auf die Gesamtpflanze ist darin zu sehen, dass die Photosyntheseleistung durch die geringere Assimilationsrate herabgesetzt sowie die potentielle Assimilationsfläche durch den Verlust von aktiven Trieben und Blättern stark verringert wird. Ferner führen infizierte Blütenpolster und Früchte zu direkten Ernteverlusten, da befallene Früchte nicht mehr kommerziell verwertbar sind (RUDGARD et al., 1993; BOWERS et.al., 2001).

Präfruktifikation

Mit dem Absterben der grünen Hexenbesen beginnt der saprophytische Lebenszyklus des Pilzes. Der Zeitraum vom Vertrocknen bis zur erstmöglichen Produktion von Basidien wird von verschiedenen Autoren als Dormanz (Ruhephase) bezeichnet (WOOD, 1973; THOROLD, 1975). Innerhalb der Dormanz ist eine Fruchtkörperbildung auch bei optimalen Witterungsbedingungen nicht möglich. Abbauenzyme wie Peroxidase wurden nachgewiesen (EVANS, 1980). Die Abbaurate von Lignin und Zellulose ist vergleichbar mit der anderer saprophytischer Basidiomyceten (EVANS, 1981).

Der Begriff Dormanz ist, genau genommen, irreführend, da es sich nicht um eine „Ruhephase“ des Pathogens handelt, sondern um den Beginn der saprophytischen Besiedlung mit sekundärem dikaryotischem Mycel. Hierbei beginnt der enzymatische Abbau des abgestorbenen Pflanzengewebes. Insofern wäre der Begriff „Präsporulation“ oder „Präfruktifikation“ besser angebracht. Dieser Zeitraum kann nach EVANS (1981) 2 bis 16 Monate andauern und beträgt im Schnitt 7 bis 8 Monate in Ekuador und 6 bis 7 Monate in Brasilien.

Über die Zusammenhänge zwischen Präfruktifikation und Beginn der Fruchtkörperbildung mit anschließender Sporulation ist nach wie vor wenig bekannt. Zur Stimulierung der Sporenbildung ist eine mehrmalige abwechselnde Befeuchtung und Trocknung der abgestorbenen Pflanzenteile Voraussetzung. Es ist schwierig, den Zeitraum einer möglichen Erstsporulation einzuschätzen, da Hexenbesen bei ungünstigen Witterungsbedingungen keine Basidien ausbilden, obwohl der Pilz dazu physiologisch in der Lage wäre.

Generative Phase

Die generative Phase des Hexenbesenzyklus beginnt mit der Ausbildung von Fruchtkörpern und der Freisetzung von Sporen. Dieser Phase wird entscheidende Bedeutung bei der Suche nach Kontrollmaßnahmen beigemessen und ist in vielen wissenschaftlichen Felduntersuchungen, vor allem während der 1980er bis Beginn der 1990er Jahre, untersucht worden (ARANZAZU, 1981a,b; CIFUENTES et al., 1981b; MILZ, 1993; RUDGARD et al., 1993). Sie kann 1 bis 3 Jahre andauern, beträgt im Allgemeinen aber nicht länger als 2 Jahre, da der Zersetzungsprozess der Hexenbesen dann meistens bereits so weit fortgeschritten ist, dass es zu keiner Fruchtkörperausbildung mehr kommt.

Von entscheidender Bedeutung für die Sporenproduktion sind die Witterungsbedingungen. Wie bereits oben erwähnt, ist es für die Ausbildung von Fruchtkörpern erforderlich, dass die trockenen, befallenen Pflanzenteile Wasser aufnehmen und anschließend austrocknen. Dieser Prozess muss mehrmals durchlaufen werden, bevor es zur Sporenbildung kommen kann. Prinzipiell sind alle abgestorbenen, befallenen Pflanzenteile zur Sporenbildung befähigt.

Die abgestorbenen, trockenen Hexenbesen können länger als 2 Jahre in der Baumkrone verbleiben und dann bei günstigen Witterungsbedingungen sporulieren. Jeder Hexenbesen im Baum bedeutet somit eine potentielle Infektionsquelle für gesunde Triebe, Früchte und Blüten während eines relativ langen Zeitraumes. Am Boden liegende Hexenbesen sporulieren ebenfalls. Bedingt durch die dort geringere Luftbewegung und der damit verbundenen höheren Feuchtigkeit, erfolgt die Zersetzung aber erheblich schneller als im Kronenbereich. In Pflanzungen, in denen Baumschnittmaßnahmen durchgeführt werden, bleiben die aus dem Kronen- und Stammbereich entfernten Hexenbesen meist in der Pflanzung liegen. EVANS (1981) bezeichnet jedoch die am Boden liegenden Hexenbesen als nicht zu vernachlässigenden Infektionsherd.

HEDGER (1987) hat die Zersetzung von Hexenbesen im Kronenbereich und auf der Bodenstreu untersucht und im Gegensatz zu EVANS festgestellt, dass die am Boden liegenden Hexenbesen innerhalb kurzer Zeit keine bedeutende Infektionsquelle mehr darstellen. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von CIFUENTES et al. (1981b) in Kolumbien und RUDGARD et al. (1993) bestätigt. In Abb. 2.5 wird der Trockengewichtsverlust von Hexenbesen in der Krone und auf der Bodenstreu aufliegend über einen Zeitraum von 20 Monaten dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass der Trockengewichtsverlust, der auf dem Boden liegenden Hexenbesen, erheblich höher ist als der in der Baumkrone verbleibenden. Die Tatsache, dass phytosanitäre Baumschnittmaßnahmen trotz des Belassens von infiziertem Schnittmaterial in den Pflanzungen zu einer erheblichen Reduzierung des Inokulum geführt haben zeigt, dass mögliche, vom Boden ausgehende, Infektionen vernachlässigt werden können (ALMEIDA, L.C. & ANDEBRHAN, 1987; ANDEBRHAN, 1987; RUDGARD et al., 1993).

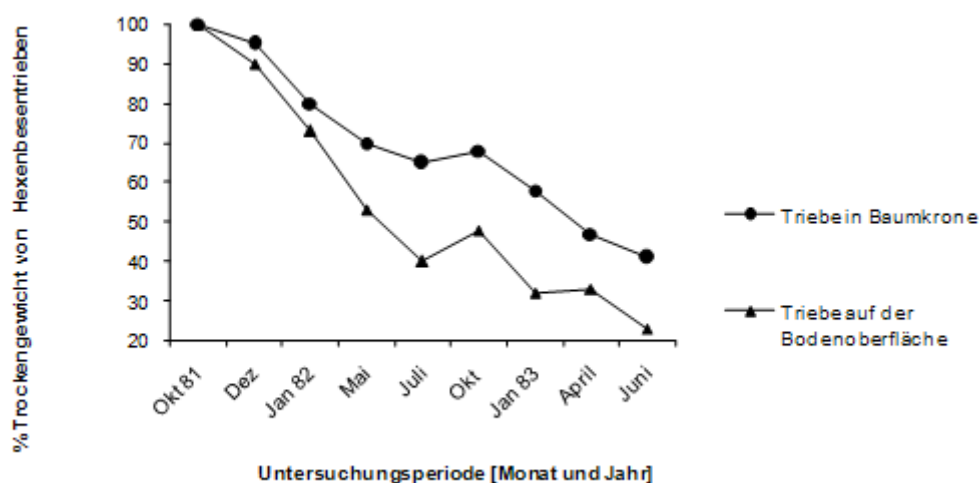


Abb. 2.5: Zeitdauer der Zersetzung von abgestorbenen Hexenbesentrieben unter Feldbedingungen in Ecuador (HEDGER, 1987:321)

2.2.4 Einfluss von Umweltfaktoren

Umweltfaktoren haben einen großen Einfluss auf die verschiedenen Entwicklungsstadien des Schaderregers. Neben der direkten Auswirkung auf die Kakaopflanze ist vor allem die Interaktion Wirt – Pathogen von Bedeutung. Fällt z. B. ein Sporulationsereignis⁶ mit einer Phase der Triebneubildung (*Flushing*) oder der Blütenbildung zusammen, so bieten sich dem Erreger eine Vielzahl von infektiösfähigem Gewebe, welches die Prädisposition für eine Erkrankung erheblich erhöht.

Temperatur

Die Temperaturverhältnisse haben bei gleichmäßiger Niederschlagsverteilung einen entscheidenden Einfluss auf die Blütenbildung. In Bahía/Brasilien, wo es zu keiner ausgeprägten Trockenzeit kommt, bewirken die relativ niedrigen Temperaturen zwischen Juni und August (< 23 °C) sieben Monate später die erntelose Zeit (Januar bis März). In Gebieten Brasiliens ohne nennenswerte jahreszeitliche Temperaturschwankungen (Rondonia sowie im Süden von Pará) tritt die Niederschlagsverteilung für die Blütenentwicklung in den Vordergrund (ALVIM, 1987).

ALMEIDA et al. (1987) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass es 3–4 Wochen nachdem die Temperaturen 23 °C unterschritten, zu einer deutlichen Abnahme der Blütenbildung kam. Ihrer Beobachtungen und statistischen Auswertungen nach schätzten sie den Einfluss der Temperatur auf die Blütenbildung auf einen Anteil von 80 % gegenüber dem Einfluss der übrigen Witterungsfaktoren.

BASTOS (1982) untersuchte die Sporenproduktion von Basidien und deren Keimfähigkeit in Abhängigkeit der Lufttemperatur. Danach findet die höchste Sporenproduktion bei Temperaturen zwischen 15 und 25 °C statt. Zwischen 35 und 40 °C konnte keine Sporenproduktion mehr beobachtet werden. Bezüglich der Sporenkeimung wurden ähnliche Resultate erzielt. Bei Temperaturen zwischen 15 und 25 °C keimten 100 % der Sporen, während ab 30 °C die Keimfähigkeit abnahm und ab 40 °C keine Keimung mehr beobachtet wurde. Laboruntersuchungen über den Trockenmassezuwachs von *Crinipellis*-Mycel in unterschiedlichen Nährmedien zeigten die höchsten Zuwachsraten bei Temperaturen von 30 °C (MUSE, R.B. et al., 1987).

⁶ Definition siehe Kapitel 3.3.3

Niederschlag

Variationen der jahreszeitlichen Niederschlagsmengen wirken sich sowohl auf die Blütenbildung als auch auf die Triebneubildung, das Flushing, aus. Ein solches Flushing kann zwar das ganze Jahr über beobachtet werden, es kommt aber meistens zu zwei ausgeprägten Perioden, die mit dem Niederschlagsregime bzw. mit dem physiologischen Entwicklungsstadium des Baumes in Zusammenhang stehen (SANTOS et al., 1980). In Urubá in Kolumbien gibt es 4–5 Flushingperioden, wovon 2 besonders stark ausgeprägt sind, eine zu Beginn der Regenzeit und eine nach der Haupterntezeit, wenn die Fruchtentwicklung nicht mehr als „sinks“⁷ um Nährstoffe konkurriert (ARANZAZU, 1981b).

Stresssituationen wie Wassermangel verringern generell das vegetative Wachstum (BALASIMHA, 1987).

Von Interesse für diese Arbeit ist die Auswirkung der Niederschläge auf die Sporulation von Hexenbesen, die an Hand verschiedener Untersuchungen dargestellt und im Folgenden am Beispiel Urubá/Kolumbien wiedergegeben wird.

ARANZAZU (1981a; 1981b) unterteilte dazu den Untersuchungszeitraum in Quartale, beginnend mit dem Zeitraum Mai–August, in dem die Sporulationsaktivität sowie die Hexenbesenneubildung im Jahresablauf beginnt (siehe folgende Übersicht).

Mai–August

- Ende April beginnt die Regenzeit
- Ab Mai erste Sporulationen nekrotisierter Hexenbesen
- Beginn des ersten Flushing
- Aufgrund noch geringer Sporenbildung erst noch geringe Anzahl von Neuinfektionen (60 Hexenbesen/100 Bäume)

August–Oktober

- Regenzeit dauert an, hohe Werte rel. Luftfeuchtigkeit
- Anstieg des Inokulum
- Kakaopflanzen befinden sich in Produktion, während dieser Phase kommt es nur zu sporadischem Triebwachstum von kurzer Dauer
- Aufgrund der geringen Prädisposition des Wirtes kommt es zu einer kurzfristigen Verringerung von Neuinfektionen

⁷ sinks (engl. sing. sink): Orte des Verbrauchs von Stoffen, die von den Orten ihrer Bildung (Sources) hierher transportiert werden. Dieser Transport folgt im einfachsten Falle als Nahtransport durch Diffusion dem Konzentrationsgradienten, der durch die Sinks und Sources erzeugt wird (BORRIS/LIPPERT 1985)

Oktober–Januar

- Regenzeit endet Mitte Januar
- Die Sporulation erreicht ihren Höhepunkt
- Die Haupternte ist vorüber, es beginnt die zweite Flushing Periode
- Hoher Zuwachs an Neuinfektionen (423/100 Bäume)

Januar–April

- Beginn der Trockenzeit
- Keine Fruchtkörperbildung mehr
- „Ruhephase“ der Kakaopflanzen, nur sporadisch auftretendes Flushing

Unter den Standortbedingungen von Urubá in Kolumbien kommt es zu einem ausgeprägten jahreszeitlichen Entwicklungszyklus von Hexenbesen, weitgehend bedingt durch die Niederschlagsverteilung und den physiologischen Zustand der Kakaopflanzen. Von Beginn der Infektion bis zur ersten Sporulation eines Hexenbesens wurde als kürzester Zeitraum 17 Wochen angegeben. Daraus leitet ARANZAZU (1981a) die Notwendigkeit von drei phytosanitären Baumschnittmaßnahmen pro Jahr zur Verringerung des Inokulum ab, und zwar im April, August und Dezember.

Strahlung

Über den Einfluss der Strahlung auf *Crinipellis* liegen nur wenige Arbeiten vor. ANDEBRHAN & PIMENTEL (1982) haben in vitro versucht, die Bildung von Fruchtkörpern zu induzieren und die allgemeine Schlussfolgerung gezogen, dass die Lichtqualität sehr wichtig für die Produktion von Basidienträgern ist. Bei ihren Untersuchungen gelang ihnen jedoch nur die Entstehung von Fruchtkörpervorstadien (Primordien).

Werden Kakaopflanzungen ohne schattenspendende Bäume der Sonnenstrahlung frei ausgesetzt, was in hochproduktiven Pflanzungen oft praktiziert wird, führt dies zu einer verstärkten Trieb- und Blütenbildung und damit verbunden zu einer Erhöhung von anfälligem meristematischem Gewebe.

- Die intensivere Strahlung durch fehlende Beschattung führt zu einer schnellen Austrocknung der Hexenbesen, was die Besiedlung dieser mit sekundären Organismen verringert und somit in hohem Maße die Sporulationsfähigkeit sowie die Lebensdauer des Inokulum verlängert.
- Die verstärkte Luftbewegung in diesen Pflanzungen fördert die Sporenverbreitung.

- Die verstärkte Schwankungsbreite der Tages- und Nachttemperaturen sowie der relativen Luftfeuchtigkeitsgehalte fördern die Sporenbildung, vor allem dann, wenn es zu starker nächtlicher Abkühlung innerhalb der Pflanzungen kommt (MILZ, 1993).

2.2.5 Maßnahmen des Pflanzenschutzes

Pflanzenschutz dient der Abwehr von Ein- und Auswirkungen abiotischer und biotischer Faktoren in der pflanzenbaulichen Produktion, die zu quantitativen Ertragsverlusten oder qualitativen Minderungen des Erntegutes führen. Die Maßnahmen zielen auf Verhütung (Prophylaxe) von Krankheiten und Schädlingen oder deren Begrenzung auf ein ökonomisch tragbares Ausmaß ab. Bei akuten Anlässen werden direkte Bekämpfungsmaßnahmen eingesetzt (HOFFMANN et al., 1985).

Bis Mitte der 1990er Jahre lag der Schwerpunkt der internationalen Hexenbesenforschung in Kakaopflanzungen in Feldforschungen zur Untersuchungen der Epidemiologie des Hexenbesenpilzes, in Kulturmaßnahmen (Baumschnitt, Schattenregulierung), der Prüfung von Substanzen zur chemischen und biologischen Kontrolle sowie in der Pflanzenzüchtung (PEREIRA, 2000).

Der Verfall der Weltmarktpreise für Kakao von 3.171 \$ US im Jahr 1984/85 auf 984 \$ US im Herbst 1992 (MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT, 1990; RUDGARD et al., 1993) hatte drastische Budgetkürzungen⁸ in vielen wichtigen Forschungseinrichtungen zu Folge, wie dem Instituto Colombiano Agropecuario ICA in Kolumbien oder dem CEPLAC⁹ in Brasilien. Umfangreiche und teure Feldforschungen wie während der 1980er und zu Beginn der 1990er Jahre durchgeführt, konnten daher nicht mehr finanziert werden.

Seit Ende der 1990er Jahre ist eine Verschiebung des Schwerpunktes der Forschungsaktivitäten zu beobachten. Sie stellt heute die Entwicklung neuer Pflanzenschutzmittel sowie moderner Ausbringungsmethoden und die Pflanzenzüchtung, einschließlich der Gentechnik zur Entwicklung resistenter und hochproduktiver Kakaoklone, in den Vordergrund (AHNERT, 2001; ANTÚNEZ DE MAYOLO, 2003; CABI, 2002; 2004, CAMUS, 2001; CATIE, 2004; LANAUD et al., 2001; PEREIRA, 2000).

⁸ Nach eigenen Beobachtungen und Gesprächen mit Wissenschaftlern dieser Einrichtungen im Rahmen von Auslandspraktika und Forschungsreisen nach Kolumbien und Brasilien zwischen 1982 und 2003.

⁹ Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira

Kulturmaßnahmen

Kulturmaßnahmen haben die Förderung aller positiven und die Vermeidung aller negativen Effekte der Wachstumsfaktoren zum Ziel. Hierzu gehören die Standortbedingungen, die Einhaltung gewisser Fruchtfolgen, Saat- und Pflanzgutauslese, Anbau resistenter Sorten, die Wahl der Saatzeit, -dichte und -tiefe, die Festlegung des Erntetermins sowie die Vernichtung von Ernterückständen oder befallenen Pflanzenteilen (HOFFMANN et al., 1985).

Im Kakaoanbau haben vor allem phytosanitäre Baumschnittmaßnahmen eine besondere Bedeutung. Diese beinhalten die Beseitigung von kranken Pflanzenteilen wie Trieben, Blütenpolstern und Früchten von infizierten Kakaobäumen (AITKEN, 1997). Ziel ist eine effektive und ökonomisch vertretbare Reduzierung des *Crinipellis* Inokulum und eine damit verbundene Stabilisierung des Pathogen-Wirt-Verhältnisses auf einem niedrigen Niveau. Grundvoraussetzung für den Erfolg sind genaue Kenntnisse sowohl der Kakaokultur als auch der Epidemiologie des Schaderregers sowie der Phänologie des Kakaobaumes einer Anbauregion. Der hohe Arbeitsaufwand, der eine Beseitigung der befallenen Pflanzenteile erfordert, bedingt die exakte Einhaltung phytosanitärer Schnittmaßnahmen in bestimmten Frequenzen und zu jahreszeitlich korrekt abgestimmten Zeitpunkten.

Aufgrund der unzureichenden Effizienz chemischer Kontrollmöglichkeiten sowie der sehr arbeitsintensiven und daher teuren Pflegemaßnahmen zur Beseitigung befallenen Pflanzmaterials, haben sich die Forschungsarbeiten nach dem Auftreten der Hexenbesenkrankheit in Bahia/Brasilien vor allem auf die möglichst effiziente Beseitigung des Inokulum durch Schnittmaßnahmen konzentriert (RUDGARD et al., 1993). Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in Zusammenhang mit den eigenen Untersuchungen in Kapitel 4 dargestellt und diskutiert.

Pflanzenzüchtung

Die Auswahl geeigneten Pflanzenmaterials mit einer möglichst hohen Toleranz gegenüber Hexenbesen ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung für den Erfolg von Kontrollmaßnahmen. Einbrüche in der Kakaoproduktion, wie im Alto Beni durch die überwiegende Verwendung des Klones SCA 6 zur Hybridsaatproduktion oder wie in Bahía durch den vorwiegenden Anbau des Amelonado – Typs, sind Beispiele für die Anfälligkeit von Pflanzungen, die mit Pflanzgut unzureichender genetischer Heterogenität angelegt wurden (BOWERS et.al. 2001).

Selektion und Züchtung

Die Selektion und Züchtung krankheitsresistenter Kakaocultivare ist nach wie vor eines der wichtigsten Aufgaben der Kakaoforschung, wobei auch die Gentechnologien eine zunehmende Bedeutung erlangen.

Der Begriff Resistenz hängt eng vom Verhalten des Wirtes als Spezies ab. Er wird vornehmlich verwendet, wenn trotz gleichmäßiger Belastung einiger Sorten oder Individuen einer Pflanzenart diese von einer Erregerart nicht oder nur geringfügig befallen wird (HOFFMANN et al., 1985). Der Begriff Immunität ist der Human- und Veterinärmedizin entliehen und bedeutet, dass der Organismus eines Warmblüters als Folge einer Primärinfektion durch Antikörperbildung unempfindlich gegen nachfolgende Infektionen geworden ist. Es handelt sich also um eine im Laufe des Lebens erworbene Resistenz (HOFFMANN et al., 1985). Der Begriff wird in der Literatur auch für Kakaoklone hinsichtlich ihrer Toleranz gegenüber Hexenbeseninfektionen verwendet (ENRIQUEZ & SORIA, 1984).

Bereits 1933 förderte die Regierung von Trinidad und Tobago Untersuchungen zur Erforschung resistenter Kakaopflanzen gegenüber Hexenbesen. HOLLIDAY (in ENRIQUEZ & SORIA, 1984) entwickelte eine Methode zur Resistenzprüfung, indem er gekeimte Kakaosamen mit einer Suspension von *Crinipellis*sporen impfte (200.000 cm^{-3}) und diese in Keimbeeten anzog. Anschließend klassifizierte er die Pflanzen nach dem Befallsgrad. So wurde SCA 6 als erster hexenbesenresistenter Klon aus der Familie Scavina selektiert. Bereits 1961 wurden Hexenbeseninfektionen von Blütenpolstern an SCA 6 in Ekuador gefunden, die sich bald weiter auf alle Bereiche des Baumes ausbreiteten, so dass dieser Klon heute nicht mehr generell als tolerant oder gar resistent einzustufen ist. Ursache hierfür liegen möglicherweise in der Existenz verschiedener physiologischer Rassen (Pathotypen) des Hexenbesenpilzes (PORRAS & SANCHEZ, 1991).

WHEELER & MEPSTED (1988) untersuchten *Crinipellis*isolate aus Bolivien, Kolumbien und Ekuador, die in Pflanzen des Klon SCA 6 starke Symptome hervorriefen, während derselbe Klon nach Impfung mit Isolat aus Brasilien, Trinidad und Venezuela symptomfrei blieb. BASTOS (1987) untersuchte verschiedene Isolate brasilianischer Herkunft an den Klonen SCA 6, SCA 12, PA 121 und ICS 39, indem er die Keimfähigkeit der Sporen auf speziell hergestellten Nährböden prüfte. Dazu wurde aus den jungen Trieben der untersuchten Klone ein Nährsubstrat hergestellt. Er fand dabei selbst innerhalb der brasilianischen Hexenbesenisolate eine breite Variabilität, die darauf hindeutet, dass es mehrere Pathotypen und sogar Biotypen von *Crinipellis* gibt. Diese Ergebnisse wurden durch Untersuchungen von PERES GRAMACHO et.al. (2005) bestätigt.

Als Hexenbesen tolerante Klone galten bis 1991 EET-399, EET-400, Silecia-1, Silecia-5, ICS-1, ICS-6, ICS-98, TSH-565, Playa Alta 1,2,4 und 5 (PORRAS & SANCHEZ, 1991). Die Suche nach tolerantem oder resistentem Pflanzenmaterial und die Selektion sowie Verbreitung neuer Kakaoklone ist nach wie vor einer der Schwerpunkte der internationalen Kakao-forschung. In der Selektion und Pflanzenzüchtung wird in Bahia/Brasilien vor allem mit dem Klon SCA 6 gearbeitet sowie mit 15 weiteren Klonen (AHNERT, 2000; AHNERT & CORREA, 2003). Hingegen werden im Rahmen des Projektes CATIE (CATIE, 2004, SOMARRIBA, E. 2005) im Alto Beni/Bolivien und im Pflanzenproduktionsprogramm der Genossenschaft EL CEIBO für den Erwerbsanbau vor allem die Klone ICS 1, ICS 6, ICS 95, TSH 565, III-12; III-04; EET-19 und IMC-67 sowie Selektionen aus der Region selbst eingesetzt. Auch zur Hybridsaatproduktion kommt, wie bereits erwähnt, SCA 6 in Bolivien nicht mehr zum Ein-satz. In der Resistenzforschung mit beschleunigten Verfahrenstechniken und der Produktion von Kakaoklonen durch Veredelungstechniken wie der Mikroveredelung¹⁰ wird noch ein großes Potential gesehen, den Kakaoanbau substanziell zu verbessern.

Biologische Methoden

Unter biologischen Kontrollmethoden wird die gesteuerte Nutzung von Organismen (und Vi-ren) und deren Leistung zum Schutz von Pflanzen und Tieren (einschließlich des Menschen) gegenüber biotischen und abiotischen Schadfaktoren verstanden. (KRIEG & FRANZ, 1989).

Die Forschungsarbeiten, die sich mit biologischen Kontrollmöglichkeiten des *Crinipellis*-Pilzes befassen, konzentrieren ihre Untersuchungen auf die saprophytische Entwicklungspha-se, also den abgestorbenen Hexenbesentrieb. Dieser kann, wie schon beschrieben, über 2–3 Jahre eine Infektionsquelle darstellen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, mögliche Antago-nisten zu finden, die entweder das Crinipellis-Mycel eliminieren oder die Sporulationsrate bzw. Keimfähigkeit herabsetzen.

BRAVO und HEDGER (1987) untersuchten unter Laborbedingungen in England ekuatoriani-sche Hexenbesen, aus denen sie 80 verschiedene saprophytische Pilzspezies isolierten, die meisten aus der Klasse der *Hyphomycetes*. Einige dieser Pilze sind Konkurrenten oder haben antagonistische Eigenschaften gegenüber Hexenbesen. *Xylaria spp.* und *Nodulisporium gre-garium*, die Crinipellis-Mycel invadierten, wurden als starke Antagonisten identifiziert. *Cop-rinus jamaicensis* ist ein vielversprechender Konkurrent mit einer schnelleren Cellulose-abbaurrate als *Crinipellis*. Andere, wie *Verticillium theobromae* und *Alternaria tennissima*

¹⁰ Bei der Mikroveredelungstechnik wird in nur 21 Tage alte Kakaosämlinge okuliert. Damit kann der Zeitraum von der Aussaat bis zum Auspflanzen der veredelten Unterlage aufs Feld um bis zu drei Monate verkürzt werden (CATIE, 2004).

penetrieren die Randkolonien des Hexenbesenmycels und verringern deutlich dessen Wachstum.

Im Jahr 1979 wurde zum ersten Mal festgestellt, dass *Cladobotryum amazonense* Fruchtkörper von Hexenbesen befiel. Filtrate dieses Pilzes konnten die Sporenkeimung von *Crinipellis* und anderer wichtiger Pathogene hemmen (ANDEBRHAN, 1981b). Der Effekt beruht auf einem Toxin mit antibiotischer Wirkung.

In Felduntersuchungen, bei denen Kakaofrüchte in unterschiedlichen Zeitabständen mit Filtrat von *Cladobotryum amazonense* behandelt wurden, verringerte sich der Anteil befallener Früchte bei 8-tägigen Spritzintervallen von 32 % (0-Variante) auf 13,5 % (BASTOS, 1980). Ein weiterer Pilz, dessen hyperparasitäre Eigenschaft auf Hexenbesen untersucht wurde, ist *Verticillium lamellicola* (ANDEBRHAN, 1981b).

Die Suche nach biologischen Kontrollmöglichkeiten während der letzten 20 Jahre hat zu der Isolierung einer neuen Spezies geführt, *Trichoderma stromaticum*, die Fruchtkörper und Pilzmycel von *C. perniciosus* parasitiert. In Brasilien sind bereits Produkte auf der Basis von *T. stromaticum* zur Kontrolle von Hexenbesen auf dem Markt (Handelsnamen „Trichovab“). Die Wirkung basiert auf den hyperparasitären Eigenschaften von *Trichoderma stromaticum* (FA 56) gegenüber dem Hexenbesenpilz. Neue *Trichoderma* Isolate, die sowohl abgestorbene als auch grüne Hexenbesen befallen, sollen in Zukunft die Kontrollmöglichkeiten der Hexenbesenkrankheit weiter verbessern (HOLMS et al., 2000).

Die unbeständigen Ergebnisse in der Anwendung von *T. stromaticum* erfordern jedoch weitere Forschungsarbeiten, um die Interaktion zwischen Kakaopflanzung, Umwelt sowie die Etablierung und das Überleben des saprophytischen Hexenbesenantagonisten besser zu verstehen. Kooperative Forschungsprojekte von nordamerikanischen, zentralamerikanischen sowie südamerikanischen Forschungseinrichtungen arbeiten an der Optimierung des kommerziellen Einsatzes von *T. stromaticum* zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit (BOWERS et.al., 2001).

Gentechnik

Die Gentechnik basiert im wesentlichen auf Methoden zur Isolierung bzw. Herstellung von DNS-Fragmenten (Genen) sowie Methoden zum Transfer und zur Vermehrung sog. rekombinanter DNS und deren Nachweis. Ziel ist, durch genetische Verfahren bestimmte Veränderungen im Erbgut von Tier, Pflanze oder Mikroorganismus hervorzurufen. Im Gegensatz zur klassischen Züchtungsforschung stehen der Technik des Gen-Transfers keine systematisch-taxonomischen Grenzen im Sinne natürlicher Kreuzungsbarrieren mehr im Weg (KRIEG & FRANZ, 1989).

Die Gentechnologie gewinnt auch im Rahmen der Kakaoforschung zunehmend an Bedeutung. Hierbei werden u. a. die genetische Struktur des Kakaos und die molekularen Interaktionen zwischen Schaderreger und Wirt erforscht. Es wird dabei nach Genen gesucht, die für mögliche Resistenzen gegenüber Schaderregern verantwortlich sind (AHNERT, 2001; ANTUÑEZ DE MAYOLO, 2003; QUEIROZ et al., 2003; SURUYDEO-MAHARAJ, S. & UMAHARAN, P. 2004).

Gentechnologische Forschungsarbeiten zur Übertragung von Polymeren wie Chitinase auf Kakaopflanzen werden bereits erprobt. Chitin ist eines der am häufigsten vorkommenden Polymere in der Natur. Es ist ein Bestandteil des Körpergerüsts von Insekten und Krustentieren und kommt auch in Zellwänden von Pilzen vor. Chitinase ist ein chitinabbauendes Enzym, das in Pflanzen und Mikroorganismen natürlicherweise vorkommt. Es wird angenommen, dass es in Pflanzen eine Funktion zur Abwehr von Pilzinfektionen hat. Pflanzen können z. T. Chitinase synthetisieren. Es ist bereits gelungen, Chitinase auf Tabak, Tomaten, Kartoffeln, Brokkoli und Äpfel zu übertragen. Im Fall von Tabakpflanzen konnte durch das Übertragen von Genen (aus Bohnenpflanzen) zur Synthetisierung von Endochitinase eine erhöhte Resistenz gegenüber bodenbürtigen Erregern wie *Rhizoctoma solanis* erzielt werden (ANTUÑEZ DE MAYOLO, 2003).

Chemische Kontrollmethoden

Chemische Maßnahmen sind prophylaktisch oder therapeutisch ausgerichtet. Sie sollen entweder das Zustandekommen eines Wirt-Parasit-Verhältnisses verhindern oder dieses vor Eintritt wirtschaftlicher Schäden durch direkte Einwirkungen auf die Schaderregerpopulation auf ein vertretbares Maß reduzieren (HOFFMANN et al., 1985).

Die Applikation von Fungiziden zur Kontrolle von Hexenbesen in Kakaopflanzungen wurde in den letzten 25 Jahren in vielfältiger Weise untersucht. Die Schwierigkeiten, die bei der chemischen Kontrolle auftreten, beschreibt EVANS (1981) wie folgt:

- Aufgrund des schnellen Triebwachstums sind Schutzmaßnahmen schwierig.
- Brauchbare systemische Fungizide, die das etablierte Hexenbesenmycel beeinträchtigen könnten, stehen nicht zur Verfügung.
- Lediglich Produkte mit protektiver Wirkungsweise auf Kupferbasis, die direkt auf Früchte aufgebracht werden, konnten Ernteverluste verringern.

Aus den oben genannten Schwierigkeiten begründet EVANS (1981) die Erfolglosigkeit der chemischen Kontrolle auf der Basis von Fungiziden bis zu dem damaligen Zeitpunkt.

Während des Zeitraumes dieser Veröffentlichung bis heute sind viele Produkte neu auf den Markt gekommen und auf ihre Wirksamkeit auf *Crinipellis* untersucht worden. Die erzielten

Ergebnisse sind teilweise widersprüchlich und aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit der angewandten Untersuchungsmethoden für eine Umsetzung in die Praxis wenig geeignet. Viele Produkte, die unter Laborbedingungen effiziente Wirkung zeigten, konnten die gleichen Resultate unter Feldbedingungen nicht erbringen (FONSECA & ALMEIDA, 1982; SILVA, 1981). Felduntersuchungen in Kolumbien von CIFUENTES et al. (1981) sowie MAYORGA & ARANZAZU (1981) führten zu dem Ergebnis, dass die systemischen Fungizide Triadimefon (Bayleton), Oxicarboxin (Plantvax), Biloxazol (Baycor), Piracarbolid (Sicarol) sowie Mineralöl die Sporulation von Hexenbesen deutlich verringerten, wobei die Mineralölanwendung das beste Ergebnis erzielte. Der Effekt des letzteren ist wahrscheinlich auf die Behinderung des Gasaustausches zurückzuführen, der die Entwicklung des Crinipellismycels beeinträchtigt.

Tab. 2.5: Chemische Verbindungen, die auf ihre Effizienz zur Kontrolle von Hexenbesen untersucht wurden (Aitken, 1997)

Wirkstoff	Handelsname	Wirkstoff	Handelsname
Biloxazo	Baycor	Cuprous oxide	Copper Sandoz
Triademifon	Bayleton	Cuprous oxide	Gaia
Oxicarboxin	Plantvax	Copper hydroxide	Garant
Carboxin	Vitavax	Copper oxychloride	Funguran
Piricarbolid	Sicarol	Copper oxychloride	Recop
Agricultural oil	Sun Oil #9	Salicylic acid	Sigma
Clove oil	Clos 96	EDTA	Sigma
Fosetyl – al	Aliette	Sulfur	Thiovit
Fenpropimorph	BAS 421 00F	Piper aduncum	Pepper Oil
Benomyl	Benlate	Captfol	Otho Difolatan
6 Benzyl amino purine (BAP)	Sigma	Captfol+copper+zinc	Otho Zincofol
Tridemorph	Calixin	Tin	Brestan
Cyclohexamide	Cyclohexamide (BDH)	Quaternary ammonia	Fegatex
Carbendazim	Derosol	Quaternary ammonia	Fungraquat
Diphenconazole	Score	Fluquinconazole	Palisade
Tebuconazole	Folicur (CE 200, 200)	Hexaconazole	Anvil
Propiconazole	Tilt	Cyproconazole	Alto 100
Triazole	E 969 (ICI)	Isoprothiolane	Fuji-one
Indole 3-acetic acid (IAA)	Sigma	Flutolanil	Moncut
L-tyrosine	L-tyrosine (BDH)	Oxytetracycline	Terramycin tree injection
	Sportack		Systhane
	RH 7592		Parasol
	Busan		Humus
	Guri		Lactating cow urine

In Tab. 2.5 werden einige der untersuchten Mittel aufgeführt, die bereits zur Kontrolle von Hexenbesen untersucht worden sind.

Seit dem Ausbruch der Hexenbesenkrankheit 1989 in Bahia ist im Rahmen von Forschungsarbeiten des CEPLAC eine Vielzahl weiterer Produkte auf ihre Wirksamkeit zur Kontrolle von Hexenbesen untersucht worden, was jedoch ebenfalls zu keinen erfolgversprechenden Ergebnissen geführt hat (AITKEN, 1997).

Auch bei diesen Untersuchungen bleibt die Frage unbeantwortet, ob bei Applikation unter Produktionsbedingungen die Ergebnisse bestätigt werden können. Die Versuche wurden zwar im Feld durchgeführt, jeder Hexenbesen ist dabei gezielt besprüht worden. Von einer gleichmäßigen Benetzung, der sich an den Triebenden und im Baumkroneninneren befindenden Hexenbesen, kann unter Praxisbedingungen nicht ausgegangen werden.

Die weitere Frage, die sich bei den bisher bekannten und einsetzbaren Mitteln stellt, ist die einer ökonomischen Faktibilität im Rahmen chemischer Pflanzenschutzbehandlungen in Kakaopflanzungen sowie die Rückstandsproblematik beim Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel (BOWERS, 2001).

HEDGER (1987), der die Zersetzung und Basidienproduktion von Hexenbesen unter Fungizid-, Insektizid- sowie Herbizidbehandlung testete, stellte z. T. eine erhebliche Interaktion zwischen den applizierten Produkten, *Crinipellis* und Konkurrenten, vor allem *Hohenbuehelia* und *Mycena* fest. So können Biozide, die zur Kontrolle von Pilzkrankheiten und Schädlingen in Kakao eingesetzt werden, stimulierend auf die Sporenbildung von *Crinipellis perniciosa* wirken, bedingt durch die Vernichtung von *Crinipellis* Antagonisten oder streuzersetzenden Organismen.

Die 1981 von Evans gemachte Feststellung bezüglich der Erfolglosigkeit von chemischen Kontrollmethoden zur Hexenbesenbekämpfung haben heute immer noch Gültigkeit. Lediglich der Einsatz von Kupferpräparaten als Präventivmaßnahme zum Schutz von Kakaofrüchten, wie sie vor allem auch gegen Phytophthoraabfall durchgeführt werden, können Ernteverluste verringern und werden nach wie vor empfohlen (AITKEN, 1997). Ein genereller Infektionsschutz oder gar kurativer Effekt auf die Gesamtpflanze ist bisher unter praktischen Anbaubedingungen noch nicht erzielt worden. Auf die generelle ökologische Problematik des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln im Kakaoanbau braucht in diesem Zusammenhang daher auch nicht weiter eingegangen werden.

Integrierter Pflanzenschutz

Eine Kombination von chemischem Pflanzenschutz und Kulturmaßnahmen stellt der integrierte Pflanzenschutz dar (Integrated pest management)¹¹, der heute nach wie vor wesentlicher Bestandteil von Pflanzenschutzprogrammen ist (CABI, 2000; PEREIRA, 2000). Unter dem Begriff „Rational Pesticide Use“ (RPU) werden neue Technologien zur Applikation von Pflanzenschutzmitteln entwickelt (Sprühgeräte, Düsen). Hierbei geht es vor allem um eine gezieltere und dosiertere Ausbringung der Pflanzenschutzmittel und der Bestimmung des optimalen Einsatzzeitpunktes, wobei sowohl chemische als auch biologische Mittel zum Einsatz kommen (CABI, 2000).

2.2.6 Ökonomische Aspekte zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit

Die Kosten für phytosanitäre oder chemische Kontrollmaßnahmen hängen von der Befallsintensität, den lokalen Bedingungen (Infrastruktur, Betriebsgröße, Lage des Betriebes), Art der Pflanzung (Beschattung, Bestandsdichte) und dem örtlichen Lohnniveau ab.

Die Zahlen der Tab. 2.6 verdeutlichen, dass bezogen auf das Jahr 1997 bei Kakaopreisen unter \$ US 1.000 t⁻¹ und einem Ertragsniveau von unter 400 kg ha⁻¹ (das von vielen Produzenten nicht einmal mehr erreicht worden ist) die Anwendung konventioneller Bekämpfungsmethoden wirtschaftlich nicht mehr zu vertreten war.

Der Aufwand für Baumschnittmaßnahmen bei starkem Hexenbesenbefall (Niveau 3) kann bis zu 90 min für einen Baum betragen, wobei 95 % des infizierten Materials beseitigt werden müssen, um eine Verringerung der Ernteverluste von 50 % zu erzielen (AITKEN, 1997). Selbst bei Beseitigung aller sichtbaren Hexenbesen an einem relativ kleinen Baum durch einen erfahrenen Arbeiter wurden anschließend noch bis zu 134 nicht beseitigte infizierte Stellen gefunden (AITKEN, 1997). Bei phytosanitären Baumschnittmaßnahmen auf dem eigenen Betrieb wurden mehr als 800 Hexenbesen an ca. 4 m hohen Kakaobäumen gezählt, für deren Beseitigung über 60 Minuten erforderlich waren. Für phytosanitäre Baumschnittarbeiten in der eigenen Pflanzung mit niedrigwüchsigen Klonen bei mittlerem Hexenbesenbefall von 30 bis 50 Hexenbesen/Baum beträgt die tägliche Arbeitsleistung 40 bis 50 Bäume/Tag.

Aitken (1997) gibt, differenziert nach Befallsintensität (Niveau 1 bis 3)¹² mit Hexenbesen, die Kosten für den Unterhalt von 1 ha Kakao für den Standort Bahia wie folgt an:

¹¹ Integrierter Pflanzenschutz ist ein Verfahren, bei dem alle wirtschaftlich, ökologisch und toxikologisch vertretbaren Methoden verwendet werden, um Schadorganismen unter der wirtschaftlichen Schadensschwelle zu halten (HOFFMANN et al. 1985).

¹² Die Befallsintensität wurde nicht quantitativ definiert

Tab. 2.6: Kosten (ha^{-1}) für integrale Pflanzenschutzmaßnahmen zur Bekämpfung der Hexenbesenkrankheit in Kakaopflanzungen, differenziert nach Befallsgrad (vereinfacht nach AITKEN, 1997)

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Lohnkosten (Reales)	164	188	388
– Unkrautkontrolle	64	64	64
– Phytosanitäre Schnittmaßnahmen	16 (2d)	40 (5d)	240 (30d)
– Fungizidspritzung	60	60	60
– Düngung	24	24	24
Materialkosten (Reales)	307	307	307
– Düngemittel NPK	97	97	97
– Fungizide	150	150	150
– Treibstoff (Sprühgeräte)	60	60	60
Gesamtkosten (Reales)	471	495	695
Gesamtkosten berechnet in kg Kakao ha^{-1}	332	349	490

(Preis pro Arroba = 12 kg Kakao \$ R 17)

Die hohen Kosten, die phytosanitäre Kontrollmaßnahmen im Kakaoanbau verursachen, erklären die Schwerpunktsetzung vieler Forschungsarbeiten hinsichtlich der Aufklärung des Reproduktionszyklus des Hexenbesenpilzes zur effizienteren Planung und Durchführung integrierter Kontrollmaßnahmen.

3 Eigene Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden im Tiefland Boliviens in der Region Alto Beni an zwei unterschiedlichen Standorten, Sapecho und Tupiza, durchgeführt. Im Folgenden wird die Region beschrieben.

3.1 Das Siedlungsgebiet Alto Beni



Abb. 3.1: Das Siedlungsgebiet Alto Beni

Bolivien ist mit einer Fläche von 1.098.581 km² der fünftgrößte Staat Südamerikas und liegt zwischen 9° 38' und 22° 53' südlicher Breite und 57° 25' und 69° 38' westlicher Länge von Greenwich.

Das Siedlungsgebiet Alto Beni befindet sich am östlichen Andenrand im Departament La Paz etwa 140 km Luftlinie nordöstlich der Stadt La Paz, die auch Regierungssitz ist. Das Gebiet umfasst Teile der Provinzen Sud Yungas, Nor Yungas und Caranavi und hat eine Fläche von 260.000 ha (CUMAT-COTESU, 1985). Die Straßenverbindung besteht aus einer geschotterten Piste, die Wegstrecke La Paz–Alto Beni beträgt 250 km.

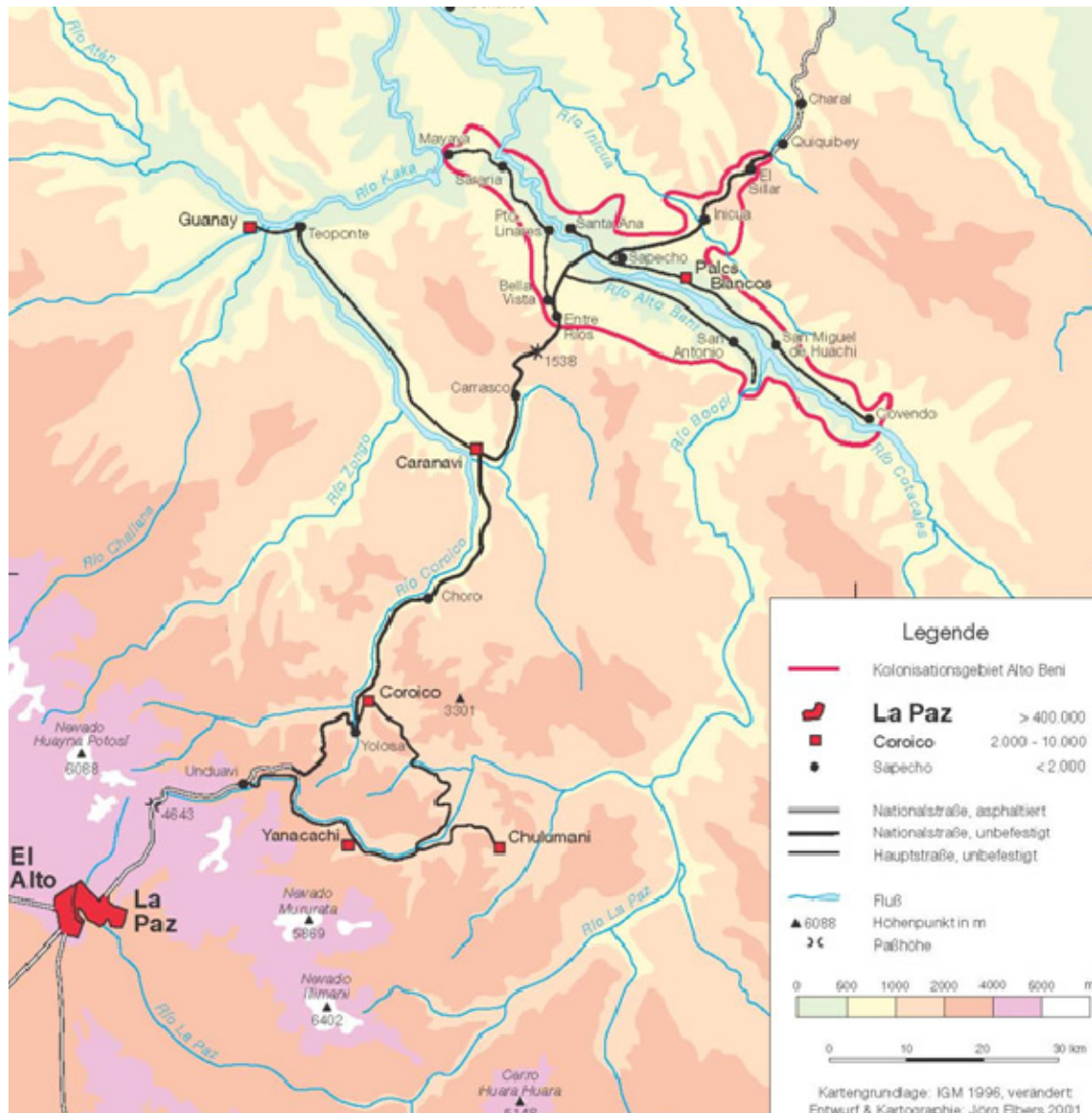


Abb. 3.2: Lage des Siedlungsgebietes Alto Beni im Nordosten Boliviens (ELBERS, 2002)

Das Tal des Alto Beni liegt zwischen 350 und 450 m über NN und wird von dem Fluss Alto Beni durchzogen, der gemeinsam mit dem Mamoré den Río Madera bildet, welcher in den Amazonas mündet. Das Talquerprofil ist charakterisiert durch eine 2–4 km breite alluviale Aufschüttungsebene. Auf beiden Talseiten schließen sich Hügelzonen an mit Höhen bis 800 m NN.

3.1.1 Böden

Repräsentative Bodeneinheiten für die Hügelzonen nach dem System der Weltbodenkarte der FAO sind *Acrisols*, *Lixisols* und *Cambisols* (ELBERS, 1991). Die für die Hügelzonen repräsentativen Böden *Haplic Acrisols* und *Dystric Cambisols* sind vorwiegend stark saure, nährstoffarme, sandige Lehm Böden mit niedriger Austauschkapazität und niedriger Basensättigung.

Sie haben schlechte Fruchtbarkeitseigenschaften. Die Gruppe der *Haplic Lixsols* und *Chromic Cambisols* zeichnen sich durch relativ gute Fruchtbarkeit aus. Es handelt sich um feiner texturierte Böden (Lehme, tonige Lehme) mit mäßig bis sehr schwach saurer Bodenreaktion, niedriger bis mittlerer Austauschkapazität und mittlerer bis hoher Basensättigung (ELBERS, 1991). In der Talebene dominieren *Fluvisols* und *Luvissols*, die, sofern ausreichende Drainage vorhanden ist, gute Fruchtbarkeit haben und gut für einjährige Kulturen geeignet sind.

3.1.2 Klima

Der Begriff Klima kann definiert werden als die Gesamtheit aller meteorologischen Erscheinungen, welche den langjährigen mittleren Zustand der Atmosphäre und der Witterung einer Region in einem bestimmten Zeitraum charakterisieren (EIMERN van, 1979).

Die Region liegt nach dem System von WALTER & BRECKLE (2004) in dem klimatischen Übergangsbereich von der äquatorialen Zone zur tropischen Sommerregenzone. Die Klimastation Sapecho, die sich auf dem Gelände des INSTITUTO BOLIVIANO DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIO (IBTA) befindet, verfügt über den längsten zusammenhängenden Messzeitraum in der Region, für den Daten aus den Jahren 1964 bis 1985 vorliegen (CUMAT-COTESU, 1985). Seit 1986 war infolge von Haushaltskürzungen ein ordnungsgemäßer Betrieb dieser Station nicht mehr möglich. Die Zentralgenossenschaft EL CEIBO in Sapecho betreibt seit 1989 eine eigene Klimastation, die gut ausgestattet ist und zuverlässig betreut wird und sich auf dem Gelände des Versuchs- und Ausbildungsbetriebes von EL CEIBO befindet.

In der Talebene des Río Alto Beni liegen die mittleren Jahresniederschläge zwischen 1.300 und 1.600 mm. Mit dem Anstieg vom Talboden in die parallel verlaufenden Bergketten kommt es zu einer deutlichen, orographisch bedingten Zunahme der Niederschläge. In der Serranía de Bella Vista in Höhen über etwa 1.200 m NN übersteigen die Jahresniederschläge mutmaßlich 4.000 mm, darauf lässt die Physiognomie der Vegetation schließen (ELBERS, 2002).

Die Regenzeit dauert von November bis März, die Zenitstände der Sonne werden Ende November und Ende Januar erreicht (WALTER & BRECKLE, 2004). In Sapecho sind laut Berechnung der Wasserbilanz nach dem System von HOLDRIDGE und TOSI (CUMAT-COTESU, 1985) im Jahresgang sieben Monate feucht (Mitte Oktober bis Mitte Mai) und die restlichen fünf Monate trocken. Ein Monat wird als trocken bezeichnet, wenn die am Ende des Monats im Boden gespeicherte Feuchtigkeit geringer ist als die Feldkapazität und als sehr feucht, wenn der Oberflächenabfluss größer als die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens ist (CUMAT-COTESU, 1985). Die mittlere jährliche Luftfeuchtigkeit liegt über 80 % (ELBERS, 2002).

Die mittleren Jahrestemperaturen im Tal des Alto Beni liegen bei 24 bis 25 °C, in den umgebenden Bergketten kommt es zur orographisch bedingten Temperaturabnahme (Entre Ríos: 22,2 °C). Die mittleren Monatstemperaturen von Sapecho, gemessen über einen Zeitraum von 21 Jahren, liegen zwischen 22,1 und 26,5 °C. Die maximalen monatlichen Extremtemperaturen liegen über 34 °C, die minimalen monatlichen Extremtemperaturen unter 16 °C. Die absoluten Extremtemperaturen betragen 39 und 4,5 °C.

Die an der Station Sapecho gemessenen Winde wehen in den Monaten September bis April fast ausschließlich aus Südosten, in der Trockenzeit dominieren Südwinde. Die Windstärke erreicht in der Regel nicht mehr als 2–3 Beaufort-Grade. Besonders im Südwinter kommt es dazu, dass die Südwinde polare Luftmassen aus antarktischen Hochdruckgebieten mit sich führen. Ein derartiger Kaltluftereinbruch, der regional als ‚surazo‘ bezeichnet wird, führt zu abrupten Temperaturstürzen von bis zu 20 °C und ist oft von Starkregenereignissen begleitet. Eine Wetterlage wie diese kann einen Tag oder länger als eine Woche andauern (HANAGARTH & SARMIENTO, 1990 in: ELBERS, 1991).

3.1.3 Landnutzung

Die Landnutzung der zugewanderten Hochlandbevölkerung ist geprägt durch den Anbau annueller Kulturen wie Reis (*Oryza sativa*), Mais (*Zea mays*), Yuca (*Manihot esculenta*) und Wassermelonen (*Citrullus vulgaris*). Von untergeordneter Bedeutung sind Taro (*Colocasia esculenta*), Bohnen (*Phaseolus vulgaris*) und Erdnüsse (*Arachis hypogaea*). Die häufigsten perennierenden Kulturen sind Baumkulturen wie Kakao (*Theobroma cacao*), Agrumen (*Citrus spp.*: Orangen, Mandarinen, Zitronen, Pampelmusen, Lima u. a.), Avocado (*Persea americana*) und Mango (*Mangifera indica*) sowie die Strauchkulturen Kaffee (*Coffea arabica*) und Tee (*Camelia sinensis*). Ökonomisch wichtige Kulturen sind ferner Bananen (*Musa spp.*: verschiedene Arten und Varietäten von Obstbananen und Kochbananen) und Papaya (*Carica papaya*). Palmen haben kaum eine wirtschaftliche Bedeutung in diesem Gebiet, die Viehzucht nur eine geringe.

Die Bodenbearbeitung erfolgt ausschließlich manuell. Lediglich zum Roden von Primärwald werden heute teilweise Motorsägen eingesetzt. Die Rodung erfolgt gegen Ende der Trockenzeit zwischen Juli und September, wobei zuerst das Unterholz geschlagen und anschließend die großen Bäume gefällt werden. Vor Beginn der Regenzeit ab Ende September, Anfang Oktober wird die Fläche abgebrannt und anschließend gesäubert. Nach zwei Anbauperioden wird das Gelände der schnellwachsenden Sekundärvegetation überlassen, wenn kei-

ne Dauerkulturen gepflanzt werden. Die Bracheperiode dauert zwischen vier und sieben Jahren.

Die durch Rodung des Regenwaldes, vor allem in den Hanglagen, verursachte Bodenerosion, ist an vielen Stellen sichtbar. Nach der Rodung ist die Bodenoberfläche den Starkniederschlägen der Regenzeit frei ausgesetzt. Es kommt zur sog. Spritzerosion (*splash erosion*). Sie führt zur Loslösung von Bodenteilchen und zur Verdichtung der Bodenoberfläche durch Einschlämmen von Feinmaterial. Nach der oberflächlichen Verschlammung und Verdichtung kommt es zur Flächen- und Rinnenerosion, die sich schließlich zur Graben- oder Gullyerosion ausweitert (ELBERS, 1991; ZOLLNER, 1991).

Eine weitere Form der Bodenerosion, die immer öfter auftritt, sind Erdrutsche. Vor allem auf den tonigen und schluffig-tonigen Lehm Böden, die mit einjährigen Kulturen oder auch mit Bananen oder Papaya kultiviert sind, rutschen nach Starkniederschlägen ganze Hangabschnitte ab. Bedingt durch das nur ungenügende Wasserrückhaltevermögen der gerodeten Flächen entstehen tonig-lehmige Schlammströme, die auf dem anstehenden Gestein zu Tal fließen.

Die Kakaokultur bietet einen wirksamen Schutz gegen Erosion, da sie durch ihr tiefgründiges Wurzelsystem und den starken Laubfall eine, dem natürlichen Wald nahekommende, Beschattung und Streuanreicherung hervorruft. Vom ökologischen Standpunkt her gesehen, ist Kakao in Kombination mit Schattenbäumen und Bodendeckern die geeignetste Kultur für Böden der Hanglagen.

3.1.4 Soziokulturelle Aspekte

Im Zusammenhang mit der Besiedlung (siehe Kap. 1) waren den Siedlern des Hochlandes jeweils 12 bis 20 ha große Flächen zur Verfügung gestellt worden, deren Bewirtschaftung der Staat in der Anfangsphase des Siedlungsprogramms durch Kredite unterstützte. Aufgrund fehlender staatlicher Finanzierungen gab es aber ab 1971 keine weiteren öffentlichen Programme mehr zur Förderung der Kolonisation im Alto Beni und neue Ansiedlungen erfolgen seither ohne Subventionen. Nach Angaben des nationalen Kolonisierungsinstituts INC¹³ (CUMAT-COTESU, 1985) lebten 1984 7000 Familien im Alto Beni mit insgesamt ca. 28.000 Einwohnern. Über 80 % der Siedler stammen aus dem Hochland oder verschiedenen Talgebieten und gehören zur Bevölkerungsgruppe der Aymara und Quechua, 5 % sind Ureinwohner der Region. Das INC hat insgesamt 114.745 ha Land vergeben, wovon bis 1980 aber nur 44.000 ha kultiviert worden sind (CUMAT-COTESU, 1985). Es kann allerdings davon aus-

¹³ Instituto Nacional de Colonización

gegangen werden, dass seitdem die kultivierte Fläche erheblich ausgeweitet worden ist. Die Daten der Volkszählung von 1992 (INE, 1997) lassen aufgrund der administrativen Zergliederung keine Rückschlüsse auf aktuelle Einwohnerzahlen der Region zu (ELBERS, 2002).

3.1.5 Anbau und Erträge von Kakao im Untersuchungsgebiet Alto Beni

Nach der Rodung des Primärwaldes und dem Abbrennen der anfallenden Biomasse wird überwiegend als Pionierkultur Trockenreis angebaut. Anschließend erfolgt das Auspflanzen der in Polyethylenbeuteln vorgezogenen Kakaopflanzen noch während der Regenzeit zwischen Dezember und Februar. Als temporärer Schatten werden, wenn überhaupt, Bananen zwischen die Reihen gepflanzt. Leguminosenarten wie *Inga spp.* und *Erythrina spp.* sind die am häufigsten verwendeten permanenten Schattenbäume. Während der 1980er Jahre hat sich der Anbau mit Bodendeckern wie Glycine (*Glycine wightii*) und Kudzu (*Pueraria phaseoloides*) durchgesetzt.

Die Pflanzabstände von Kakaobäumen betrugen bei alten Pflanzungen 4 x 4 m, Neupflanzungen werden mit Pflanzabständen bis zu 3 x 3 m angelegt. Die wichtigsten Kulturmaßnahmen sind die Unkrautkontrolle (2 bis 3-mal pro Jahr) sowie ein Erhaltungsschnitt gegen Ende der Ernte zwischen September und November. Die Erträge liegen in der Region im Schnitt bei 230 kg ha⁻¹. In gut geführten Pflanzungen werden aber auch Ernteerträge bis zu 1000 kg ha⁻¹ und mehr erzielt.

Die Hauptursache der niedrigen Erträge wurden in erster Linie dem mangelndem Unterhalt der Pflanzungen, starkem Krankheits- und Schädlingsbefall sowie schlechtem Pflanzmaterial zugeschrieben (GUTIERREZ, 1986). Ein Großteil des vom staatlichen Forschungsinstitut IBTA¹⁴ produzierten Hybridsaatgutes wurde bis Anfang der 1980er Jahre unter der Verwendung des Klons Scavina 6 gewonnen (CENTRAL DE COOPERATIVAS EL CEIBO, 1993; TRUJILLO, G. 2007). Der aus Ekuador stammende Klon war in den 1960er Jahren resistent gegenüber der Hexenbesenkrankheit. Die Resistenz wurde jedoch in Ekuador bald durchbrochen und heute gilt Scavina 6 auch dort als anfällig gegenüber der Hexenbesenkrankheit. Trotz dieser Tatsache wurde noch bis Mitte der 1980er Jahre in Bolivien Hybridsaatgut unter dessen Verwendung hergestellt.

Die Ernte der reifen Kakaofrüchte, botanisch Beeren, erfolgt durch das Abschneiden mit Erntemesser, Machete oder Baumschere. Anschließend werden die Früchte aufgeschlagen und die mit weißem Fruchtfleisch umhüllten Samen in Holzkisten gepackt. Dort werden sie 6

¹⁴ Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria

bis 8 Tagen vergoren, wobei sich erst das typische Kakaoaroma entwickelt, und anschließend an der Sonne getrocknet. Damit ist der Produktions- und Verarbeitungsprozess auf dem Betrieb abgeschlossen.

3.2 Material und Methoden der Datenerhebung

Die Untersuchungen zur Epidemiologie von *C. pernicioso* wurden an zwei unterschiedlichen Standorten vorgenommen; auf dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb in der Nähe der Ortschaft Sapecho sowie in einer Pflanzung eines Siedlers in der Kolonie Tupiza. Die Untersuchungen an den verschiedenen Kakaoklonen erfolgten nur auf dem eigenen Betrieb am Standort Sapecho.

3.2.1 Beschreibung der Experimentalpflanzungen

Standort I – Sapecho

Die untersuchte Kakaopflanzung am Standort Sapecho befindet sich in der Flussebene des Rio Alto Beni ca. 1,5 km vom Flusslauf und 500 m von der Ortschaft entfernt. Die Kakaopflanzung war in den 60er Jahren mit aus Ekuador, Trinidad und Peru stammendem Hybrid Saatgut angelegt worden und wies eine Beschattung mit altem Baumbestand der Gattung *Inga* ssp. (25 Bäume/ha) auf. Sie ist im Jahr 1990 aufgrund der Empfehlung von internationalen Kakaoexperten durch Veredlung von Chupons mit fünf unterschiedlichen Klonen erneuert worden. Die ursprünglichen Pflanzabstände der Hybridpflanzung von 3 m x 5 m mussten daher beibehalten werden, auch wenn sie nicht als optimal für die Kakaokultur angesehen werden. Die Edelreiser stammten aus dem Klongarten der Zentralgenossenschaft EL CEIBO. Nach starkem Rückschnitt der Bäume wurde in die sich anschließend entwickelnden Basistriebe von Fachleuten okuliert und der Mutterbaum im Laufe der folgenden zwei Jahre stufenweise zurückgeschnitten und schließlich vollständig eliminiert. Einzelne ertragreiche Hybridbäume verblieben im Bestand ohne Veredelung.

Im Jahr 1995 wurden die alten Schattenbäume durch Ringeln des Stammes zum Absterben gebracht und anschließend gefällt. Nach einem Beratungsbesuch mit E. GÖTSCH (Experte für Agroforstsysteme) gestaltete ich auf seine Empfehlung hin die Kakaopflanzung ab Ende 1996

mit Bananen sowie verschiedenen Holz- und Fruchtbaumarten in ein Agroforstsystem um¹⁵. Alle natürlicherweise aufkommenden Baumarten, die meist zum Sekundärwaldsystem gehören wie Balsa (*Ochroma pyramidales*), *Cecropia* ssp. und andere, wurden im Rahmen selektiver Beikrautregulierung gezielt gefördert.

¹⁵ Die Umstellung erfolgte, indem Bananen im Abstand von 4 m zwischen die Kakaoreihen gepflanzt und Schattenbäume der Arten *Inga* ssp. und *Erythrina* ssp. per Samen im Abstand von 0,5 m in die Bananenreihen ausgesät wurden. Weitere Arten wie Arasá (*Eugenia spitptata*), Patasta *Theobroma bicolor*, Copuazú (*Theobroma grandiflora*), Asai Palmen (*Euterpe* ssp.), Pfirsichpalme (*Bactris gasipaes*), Kapok (*Ceiba* ssp.), *Guazuma ulmifolia*, Orangen (*Citrus sinensis*), *Brosimum alicastrum*, (nativer Name Leche Leche), Avokado (*Persea americana*), *Carica* ssp. (nativer Papayabaum), Drachenblut (*Croton draconoides*), *Schizolobium amazonicum* (nativer Name Toco), *Rheedia gardneriana* (Achachairú), Knoblauchbaum (*Gallesia integrifolia*), Amazonasnuss (*Bertholetia excelsa*), *Spondias mombin* (Cedrillo), *Centrolobium ochroxylum* (Huasicucho), Majopalme (*Oenocarpus battana*), Mahagoni (*Swietenia macrophylla*), *Clarisia racemosa* (Mascajo), Nussbaum (*Juglans boliviana*), *Hymenaea courbaril* (Paquí), *Myroxylon balsamum* (Quina quina), *Amburana cearensis* (Roble), *Hura crepitans* (Soliman), *Sapindus saponaria* (Solulo), *Terminalia oblonga* (Verdolago), Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) und andere mehr wurden in Pflanzcontainern vorgezogen und zwischen die Inga, *Erythrina* und Bananen ausgepflanzt.

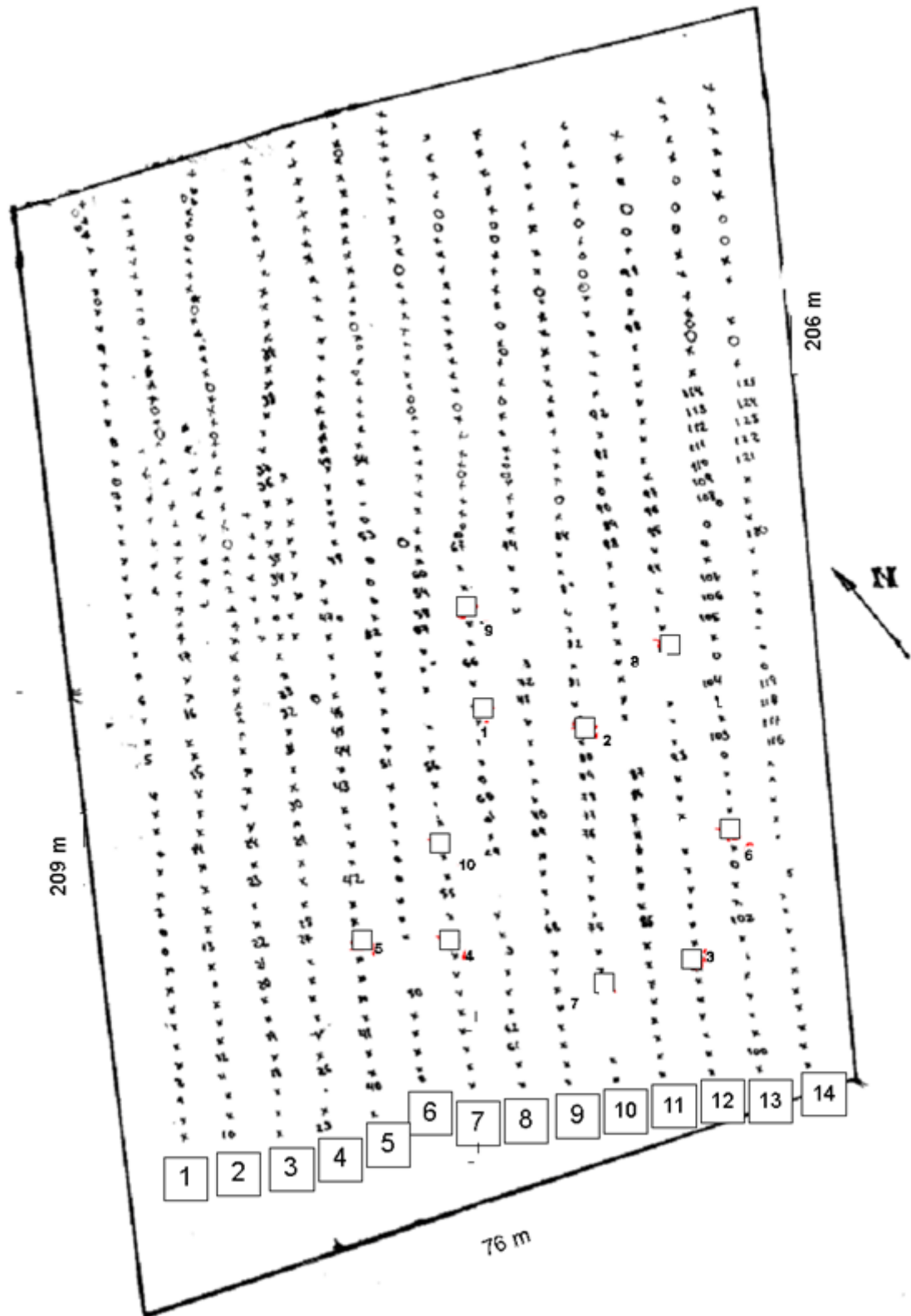


Abb. 3.3: Skizze des Lageplans der untersuchten Kakaoklone sowie der 10 Hybridkakaobäume der Kakaopflanzung Milz am Standort Sapecho.

Diese kann nur einen ungefähren Eindruck über die Lage der einzelnen Bäume innerhalb der Pflanzung geben. Erläuterungen dazu siehe Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Legende zu Lageplan Abb. 3.5. Die untersuchten Kakaoklone sind nach ihrer Position in den Pflanzreihen aufgeführt.

Reihe in Kakaopflanzung													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ICS 6 I-1	ICS-6 V-2	ICS-6 I-2	ICS-6 V-1	ICS-1 VIII-4	ICS- 1 V- 1	565 II-2	565 I-3	565 V-4	565 IV-5	ICS 8 IV-2	ICS 8 II-4	ICS 8 IV-5	ICS 95 V-3
ICS-6 II-1	ICS-6 IV-4	ICS-6 III-4	ICS-1 V-1	ICS-1 VIII-4	565 I-1	565 II-3	565 III-4	565 V-5	ISC 8 I-1	ICS 8 III-2	ICS 8 IV-3	ICS 95 I-1	ICS 95 I-4
ICS-6 III-1	ICS-6 III-3	ICS-6 III-5	ICS-1 III-1	ICS-1 I-4	565 II-1	565 III-2	565 IV-3	565 V-1	ICS 8 IV-1	ICS 8 I-3	ICS 8 II-5	ICS 95 II- 1	ICS 95 II-4
ICS-6 IV-1	ICS-6 I-3	ICS-6 I-5	ICS 1 II-1	ICS-1 IV-4	565 III-1	565 V-2	565 V-3	565 IV-2	ICS 8 II-1	ICS 8 II-3	ICS 8 III-4	ICS 95 III- 1	ICS 95 III- 4
ICS-6 IV 3	ICS-6 II-3	ICS-6 II-2	ICS 1 IV 1	ICS-1 V-4	565 IV 1	565 I-2	565 II-4	565 I-5	ICS 8 III-1	ICS 8 III-3	ICS 8 I-5	ICS 95 IV- 1	ICS 95 IV- 4
ICS-6 IV-2	ICS-6 I-4	ICS-6- V-5	ICS 1 II-2	ICS-1 III-5		565 III-3	565 I-4	565 II-5	ICS 8 V-2	ICS 8 V-3	ICS 8 IV-4	ICS 95 V-1	ICS 95 V-4
ICS-6 V-3	ICS-6 IV-5	ICS-6 II-5	ICS-1 V-2	ICS-1 IV-5			565 IV-4	565 III-5	ICS 8 V-1	ICS 8 V-4	ICS 8 III-5	ICS 95 I-2	ICS 95 I-5
ICS-6 V-4	ICS-6 II-4		ICS 1 III-2	ICS-1 V-5					ICS 8 I-2	ICS 8 V-5		ICS 95 II- 2	ICS 95 II-5
ICS-6 V-2			ICS-1 IV-2	ICS-1 II-5					ICS 8 II-2			ICS 95 III- 2	ICS 95 III- 5
			ICS-1 II-2	ICS-1 II-5					ICS 8 III-2			ICS 95 IV- 2	ICS 95 IV- 5
			ICS-1 I-3									ICS 95 V-2	ICS 95 V-5
			ICS-1 II-3									ICS 95 I-3	
			ICS-1 III-3									ICS 95 II- 3	
			ICS-1 V-2									ICS 95 III- 3	
			ICS-1 II-4									ICS 95 IV- 3	

I	= kein Schnitt	Klone : ICS 1; ICS 6; ICS 8;
II	= Schnitt Dezember	ICS 95; TSH 565
III	= Schnitt Oktober, Februar	x = Kakaoklone
IV	= Schnitt Oktober, Februar, Juni	1-125 = untersuchte Kakaoklone
V	= Oktober, Dezember, Februar, April, Juni, August	o = Fehlstellen
1– 5	= Kennzeichnung der Wiederholungen	1–10 Phänologische Untersuchungen an 10 Hybridbäume

Beispiel: ICS-8

IV-3 (Reihe 12 in Kakaopflanzung)

ICS-8 = Bezeichnung des Klonen

IV = durchgeführte Baumschnitte Oktober, Februar, Juni

3 = Wiederholung Nr. 3

Standort II Tupiza

Die untersuchte Kakaopflanzung befindet sich auf dem Betrieb des Siedlers Roberto Serna in der Kolonie Tupiza auf 680 m NN. Sie weist eine Hangneigung in südöstlicher Richtung auf. Der Standort Tupiza liegt 12 km von Sapecho entfernt direkt an der Transamazonica gelegen an der in nordöstlich verlaufenden Hügelkette der Serranía de Marimonos.

Die Pflanzung am Standort Tupiza ist mit Hybridsaatgut ohne Schattenbäume angelegt worden. Das Saatgut stammte von der staatlichen Versuchsstation IBTA in Sapecho. Zu Beginn der Untersuchungen war diese Pflanzung 12 Jahre alt. Trotz regelmäßiger Pflegemaßnahmen wie Unkrautkontrolle und Unterhaltungsbaumschnitt lag der Ertrag unter 160 kg ha^{-1} .

Beobachtung der Witterungsverhältnisse an den Standorten

Für die Messungen am Standort Sapecho konnten die Daten für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag als Einflussgrößen auf das Wachstum der Kakaopflanzen und die Entwicklung des Hexenbesens über die Wetterstation von EL CEIBO erfasst, detailliert registriert und ausgewertet werden.

Für den Standort Tupiza wurde während des Untersuchungszeitraumes eine eigene Wetterstation eingerichtet, die vom Verfasser eigenständig betreut wurde.

Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Die Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit wurden an beiden Standorten mit einem Thermo-hygrographen gemessen. Der Wechsel der Registrierstreifen erfolgte wöchentlich. Die Tagesdurchschnittstemperatur wurde nach dem hier üblichen Verfahren aus dem Mittel der Höchst- und der Tiefsttemperatur errechnet.

Niederschlag

Der Niederschlag wurde in der Wetterstation am Standort Sapecho mit einem Hellmann-Regenmesser gemessen. Die Registrierung erfolgte täglich. Am Standort Tupiza erfolgte die Messung mittels eines automatischen Hellmann-Regenschreibers (Messzeitraum 7-Tage).

3.2.2 Versuchsanordnung

Die folgende Abbildung stellt den Aufbau der Untersuchungen in einer Übersicht dar.

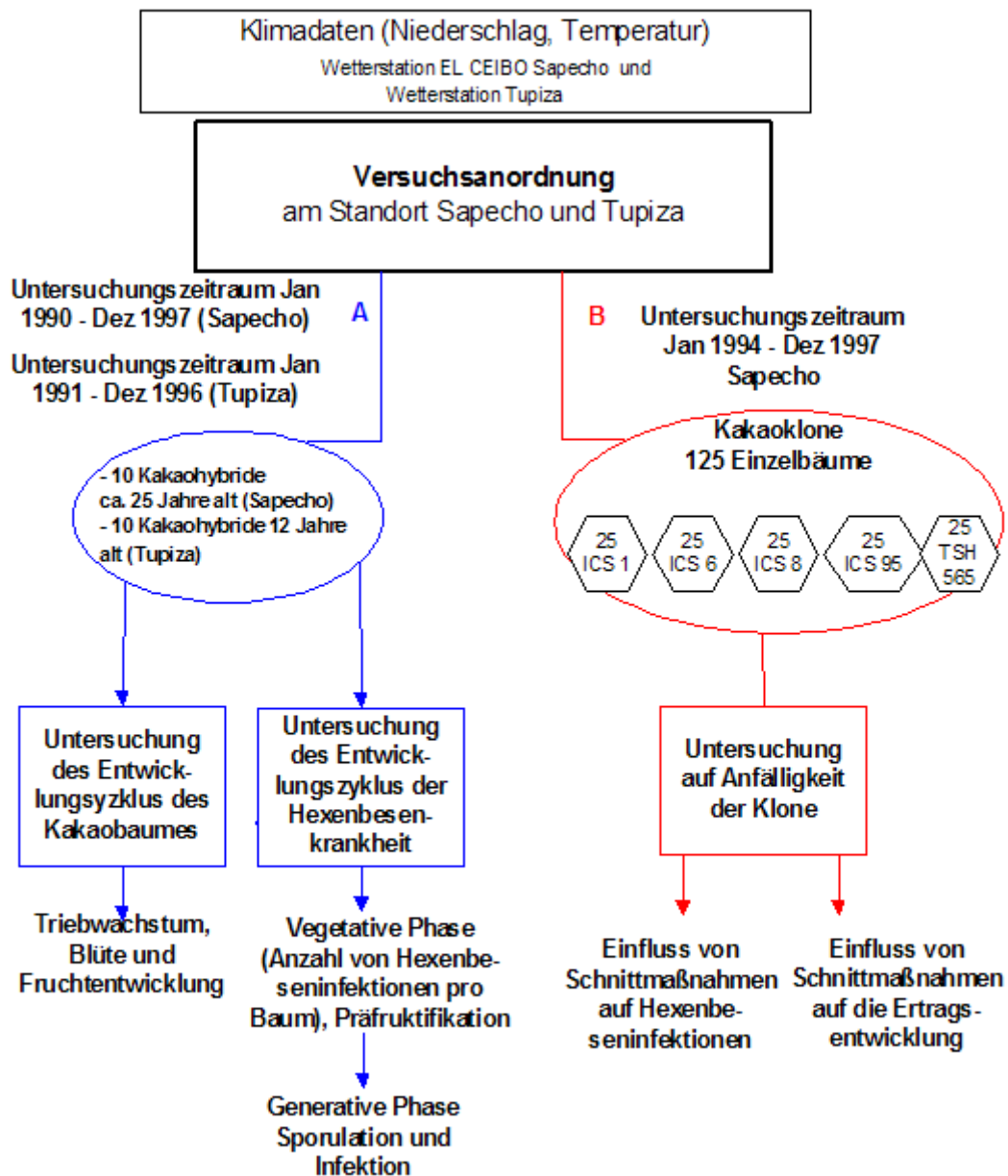


Abb. 3.4: Untersuchungen zur Dynamik der Hexenbesenkrankheit in Kakaopflanzungen (Standorte Sapecho und Tupiza) sowie des Einflusses von Baumschnittfrequenzen auf verschiedene Kakaoklone (Standort Sapecho)

Wie aus Abb. 3.4 ersichtlich, gliedert sich die Untersuchung in zwei Bereiche:

Bereich A betrifft Untersuchungen zum vegetativen und generativen Entwicklungszyklus des Hexenbesenpilzes und des Entwicklungszyklus des Kakaobaumes bezüglich Blüten- und Fruchtentwicklung sowie des Triebwachstums. Diese Untersuchungen wurden an den Standorten Sapecho und Standort Tupiza an jeweils 10 Hybridkakaobäumen durchgeführt.

Bereich B betrifft Untersuchungen von 5 verschiedenen Kakaoklonen mit jeweils 25 Einzelbäumen auf Hexenbesenanfälligkeit und Ertrag. Weiterhin wurde die Effizienz von Kontrollmaßnahmen in Form unterschiedlich häufig durchgeführter phytosanitärer Baumschnittmaßnahmen (durch Entfernen befallener Pflanzenteile) an diesen Klonen untersucht. Diese Untersuchungen wurden nur am Standort Sapecho durchgeführt.

3.2.3 Untersuchungen zum Entwicklungszyklus des Kakaobaumes und der Hexenbesenkrankheit (Bereich A)

Die Datenerhebung zum Entwicklungszyklus des Kakaobaumes und zur Beobachtung des Reproduktionszyklus der Hexenbesenkrankheit begann im Rahmen der Erstellung meiner Diplomarbeit am Standort Sapecho bereits im Januar 1990 und dauerte bis August 1992. Für die Untersuchungen der Dissertation wurde die Datenerhebung an diesem Standort bis Ende 1997 fortgeführt. Ab 1991/92 wurde eine weitere Versuchsanlage am Standort Tupiza eingerichtet, die Auswertung dieser Daten erfolgte ausschließlich für die hier bearbeitete Thematik

Entwicklungszyklus des Kakaobaumes

Die für die Untersuchungen ausgewählten 10 Hybridkakaobäume wurden an jedem Standort mit nummerierten Metallplaketten markiert, die Beobachtungen (Blüten- Frucht- und Triebwachstum) erfolgten am selben Tag, in Ausnahmefällen im Abstand von höchstens 2 Tagen. Jeder dieser Parameter wurde wöchentlich (immer montags) nach einer festgelegten Boniturskala einzeln bewertet: von 0 = keine Ausprägung, bis 10 = starke Ausprägung. Im Falle der Fruchtentwicklung wurden nur gesunde Fruchtansätze ab 5 cm Länge bonitiert, die Bewertungsskala ist in Tab. 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Boniturskala zur Bewertung des Fruchtansatzes an Hybridbäumen

Anzahl Früchte	Boniturbewertung
0	0
1–5	1
6–10	2
11–15	3
16–20	4
21–25	5
26–30	6
31–35	7
36–40	8
41–45	9
> 45	10

Die Bewertung der Intensität von Blüten- und Triebentwicklung erfolgte nach subjektiven Kriterien, ebenfalls in einer Boniturskala von 1 bis 10. Die subjektiven Bewertungskriterien wurden mit dem Mitarbeiter „kalibriert“ und regelmäßig abgestimmt. Da während des gesamten Untersuchungszeitraumes diese Datenerhebung ausschließlich von mir persönlich und einem dafür angelernten Mitarbeiter durchgeführt wurden und es sich hierbei nicht um eine quantifizierbare exakt zu bestimmende Größe handeln musste, wurde diese Vorgehensweise als hinreichend erachtet.

Entwicklungszyklus der Hexenbesenkrankheit

Die weitaus wichtigste Infektionsquelle von Hexenbesen sind abgestorbene, befallene Triebe aus dem Kronenbereich des Baumes. Befallene Früchte und Blütenpolster bilden nur selten und in geringem Maße Fruchtkörper des Pilzes aus. Die Untersuchungen zur Epidemiologie des Hexenbesens konzentrierten sich daher auf die Erfassung von Triebinfektionen an Kakao-bäumen (SCHMIDT et al, 1993).

Vegetative Phase

Zu Beginn der Untersuchungen wurden in beiden untersuchten Pflanzungen an sämtlichen Bäumen sorgfältig alle sichtbaren mit Hexenbesen infizierten Stellen mit einer handelsüblichen Baumschere bzw. einem Buschmesser entfernt und auf der Bodenoberfläche belassen.



Abb. 3.5: Untersuchungsgerüst für Hexenbesen

Zur Erfassung der vegetativen Phase des Hexenbesens sind an beiden Standorten infizierte Triebe und Blüten der markierten Kakaobäume mit farbigen Nylonstreifen gekennzeichnet und mit einem wasserunlöslichen Faserschreiber mit dem entsprechenden Datum versehen worden. Nach dem vollständigen Absterben der markierten Hexenbesentriebe wurden diese aus der Baumkrone entfernt, das Datum registriert und zur weiteren Untersuchung in ein 150 cm hohes Gerüst an Holzrahmen mit dünnen Drähten zu jeweils 10 Hexenbesen am Rande der Kakaopflanzung aufgehängt (Abb. 3.5). Infizierte Blütenpolster wurden abgeschnitten und auf dem Boden belassen. Jeder Rahmen wurde mit einer römischen Zahl nummeriert, die Position der einzelnen Hexenbesen auf dem Rahmen mit arabischen Zahlen von 1 bis 10 (Abb. 3.6).

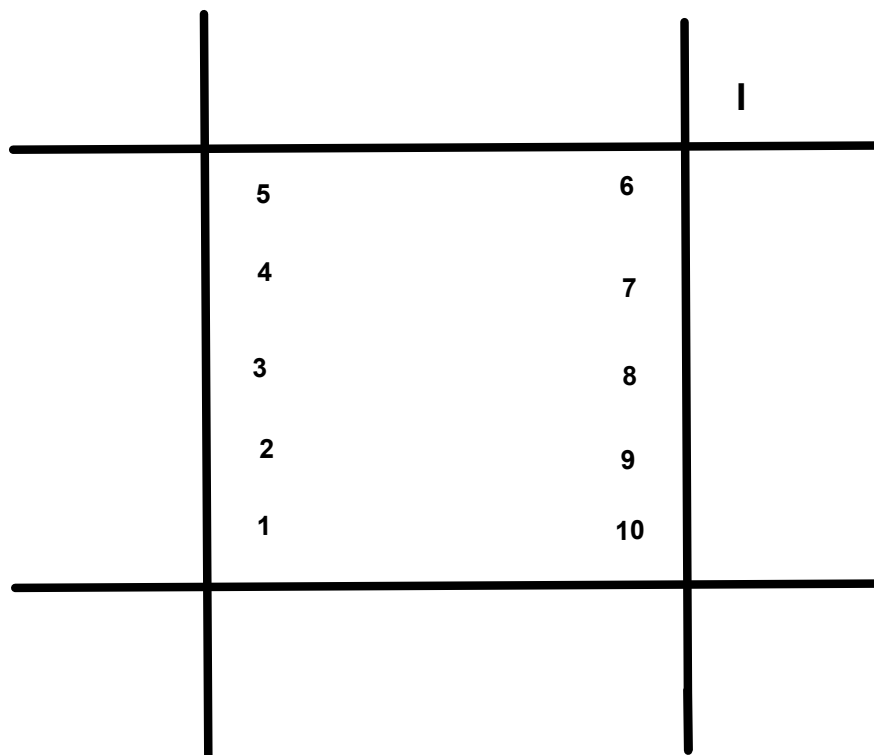


Abb. 3.6: Schematische Darstellung der Anordnung und Kennzeichnung von abgestorbenen Hexenbesen an Untersuchungsrahmen

Es wurden Hexenbesentriebe an Blüten und Trieben der Kakaobäume sowie der Zeitraum ihres vegetativen Stadiums ab dem Zeitpunkt der erkannten Symptomausbildung erfasst.

Generative Phase

Die generative Phase des Pilzes beginnt mit der Ausbildung der Fruchtkörper, die sich gut sichtbar an den abgestorbenen, befallenen Pflanzenteilen befinden. Jeder Hexenbesen war nach dem Datum der Beseitigung aus dem Kakaobaum identifizierbar. Die Hexenbesen blieben in einigen Fällen bis zu über zwei Jahren in den Untersuchungsrahmen hängen, bis keine Fruchtkörper mehr ausgebildet wurden. Durch kontinuierlich neu auftretende Infektionen an

den untersuchten Bäumen kam es im Laufe der Untersuchungen zu einer stetigen Zunahme von abgestorbenen Hexenbesen, was eine fortlaufende Erweiterung des oben beschriebenen Beobachtungsgerüsts erforderlich machte.

Die Auszählung der Fruchtkörper an den abgestorbenen Hexenbesentrieben erfolgte wöchentlich. Dazu wurden die Fruchtkörper mit einer Pinzette beseitigt und deren Anzahl pro Hexenbesen registriert. Während sehr feuchter Witterungsbedingungen lassen sich Fruchtkörper, die bis zu einer Woche alt sind, gerade noch identifizieren. Insofern war eine wöchentliche Datenerfassung angemessen.

Ausgewertet wurde:

- der Zeitraum der Symptomausbildung an Kakaotrieben bis zur ersten Sporulation der abgestorbenen Hexenbesentriebe,
- die Sporulationsintensität (Anzahl an Fruchtkörpern pro Hexenbesen),
- die Sporulationshäufigkeit (Anzahl der Sporulationsereignisse pro Hexenbesen),
- die Dauer der Fähigkeit der abgestorbenen Hexenbesentriebe, Fruchtkörper auszubilden.

Bei der Auszählung wurde nicht die Größe der Fruchtkörper berücksichtigt. Es ist jedoch auffallend, dass es während der trockeneren Monate nur zu vereinzelter Fruchtkörperbildung kommt, die Fruchtkörper sehr klein bleiben und sich z. T. gar nicht richtig ausbilden. Ebenfalls ist zu bemerken, dass die Größe der Pilzkörper mit zunehmendem Alter der trockenen Triebe abnimmt.

3.2.4 Untersuchungen an fünf verschiedenen Kakaoklonen auf Hexenbesentoleranz und auf Ertragsentwicklung (Bereich B, Standort Sapecho)

Die Untersuchungen der Klone auf Hexenbesenbefall sowie der unterschiedlichen Frequenzen von Baumschnittmaßnahmen wurden von 1994 bis 1997 am Standort Sapecho durchgeführt. Aus dem Bestand der veredelten Pflanzung wurden von jedem der zu untersuchenden Klone jeweils 25 Bäume ausgewählt, die ungefähr den gleichen Wuchshabitus und Entwicklungsstand aufwiesen. Jeweils fünf dieser Bäume sind nach dem Zufallsprinzip markiert und der gleichen Schnittfrequenz unterzogen worden (5 unterschiedliche Schnittfrequenzen x 5 Klone x 5 Bäume = 125 Bäume). Insgesamt wurden daher 125 Einzelpflanzen für die Untersuchungen berücksichtigt. Die übrigen Kakaobäume sind jährlich während der Monate Oktober und November einem phytosanitären Baumschnitt unterzogen worden. Das geschnittene Astmaterial sowie die beseitigten Hexenbesen verblieben auf der Bodenoberfläche.

Durchführung von Baumschnittmaßnahmen

Vor Beginn der Untersuchungen an Kakaoklonen wurden in der gesamten Versuchspflanzung alle Hexenbeseninfektionen an Kakaobäumen sorgfältig entfernt.

Tab. 3.3: Baumschnittfrequenzen an Kakaoklonen

Kenzeichnung	Anzahl Schnitte	Termine
I	Kein Schnitt	–
II	1 Schnitt	Dezember
III	2 Schnitte	Oktober, Februar
IV	3 Schnitte	Oktober, Februar, Juni
V	6 Schnitte	Oktober, Dezember, Februar, April, Juni, August

Jede Baumschnittmaßnahme wurde an jeweils fünf Bäumen eines Klons nach dem in Tab. 3.3 dargestellten Zeitplan durchgeführt.

Die Datenerhebung zum Hexenbesenbefall der untersuchten Klone erfolgte monatlich durch genaue Kontrolle der 125 registrierten Bäume. Um eine mehrfache Auszählung zu vermeiden, wurden die infizierten Pflanzenteile mit farbigen Nylonstreifen markiert. Für jeden Untersuchungsmonat wurde eine andere Farbe verwendet. Erst zu dem festgesetzten Schnittzeitpunkt der jeweiligen Kakaopflanzen erfolgte die Entfernung der Hexenbesentriebe, der Früchte und der infizierten Blütenpolster aus der Baumkrone und dem Stammbereich. Die abgeschnittenen Hexenbesentriebe wurden auf der Bodenoberfläche belassen und mit Laubstreu bedeckt.

Ertragsentwicklung

Die Untersuchung der Produktionsdaten geschah individuell für jeden Baum der markierten Klone. Je nach Grad der Abreife der Früchte wurden die Untersuchungen zeitgleich mit den Erntearbeiten in der Pflanzung durchgeführt. Die reifen Früchte wurden gezählt, geöffnet und die frische Kakaomasse mit einer elektronischen Küchenwaage gewogen.

3.2.5 Beschreibung der Klone

Die folgende Beschreibung der untersuchten Klone wurde dem Katalog der Kakaoklonsammlung des Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE/ Costa Rica (CATIE, 1981) sowie dem Bericht des bolivianischen Forschungsinstitutes Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria IBTA (CEIBO, 1993) entnommen. Es werden dabei nur die wichtigsten Merkmale berücksichtigt, die aus pflanzenbaulicher Sicht von Interesse sind, wie:

- Herkunft
- Fruchtfarbe

- Befruchtungseigenschaften (selbstverträglich, obligater Fremdbefruchter)
- Fruchtindex (gibt die Anzahl von Früchten an, die zur Gewinnung von 1 kg trockenen Kakaosamens benötigt wird)
- Samenindex (gibt das durchschnittliche Gewicht in g eines getrockneten Kakaosamens an)

Die Werte für den Fruchtindex sowie den Samenindex weichen beim Vergleich der angegebenen Quellen erheblich voneinander ab.

ICS 1

Herkunft: Imperial College, Trinidad

Fruchtfarbe: rot

Befruchtung: selbstfertil

Fruchtindex: 12,0 (IBTA) 16,3 (CATIE)

Samenindex: 1,24 (IBTA) 1,7 (CATIE)



Abb. 3.7: Kakaoklon ICS 1

ICS 6

Herkunft: Imperial College, Trinidad

Fruchtfarbe: grün (gelb bei Fruchtreife)

Befruchtung: selbststeril

Fruchtindex: 8,50 (IBTA) 16,0 (CATIE)

Samenindex: 1,55 (IBTA) 1,74 (CATIE)



Abb. 3.8a und 3.8b: Kakaoklon ICS 6

ICS 8

Herkunft: Imperial College, Trinidad
Fruchtfarbe: grün (gelb)
Befruchtung: selbstfertil
Fruchtindex: 7,90 (IBTA)
Samenindex: 1,37 (IBTA)



Abb. 3.9: Kakaoklon ICS 8

ICS 95

Herkunft: Imperial College, Trinidad
Fruchtfarbe: rot
Befruchtung: selbstfertil
Fruchtindex: 13,0 (IBTA) 43,3 (CATIE)
Samenindex: 1,01 (IBTA) 0,69 (CATIE)



Abb. 3.10: Kakaoklon ICS 95

TSH 565

Herkunft: Trinidad

Fruchtfarbe: rot

Befruchtung: selbststeril

Fruchtindex: 8,6 (IBTA)

Samenindex: 1,20 (IBTA)



Abb. 3.11: Kakaoklon TSH 565

3.2.6 Methoden der statistischen Auswertung

Die statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse erfolgte durch die SAS Zeitreihen- und Mixed Model Analysen unter Anwendung des Tukey Tests (Differences of Least Squares Means).

Die log-transformierten Residuen der Daten sind normalverteilt und erfüllen damit die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse.

3.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse im Wesentlichen in der gleichen Reihenfolge aufgeführt wie in der grafischen Versuchsanordnung dargestellt. Aufgrund des Einflusses, den die Witterungsverhältnisse auf den Entwicklungszyklus von Hexenbesen und auf die physiologische Entwicklung des Kakaobaumes haben, werden zunächst Beobachtungen von Niederschlag und Temperatur während des Untersuchungszeitraumes dargestellt.

3.3.1 Klimadaten

Der Zeitraum für die Klimadatenerhebung am Standort Tupiza ist relativ kurz. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen diese Daten vor allem dazu dienen, die Unterschiede der beiden Standorte Sapecho und Tupiza hervorzuheben und sie in einen Zusammenhang zur Befallsentwicklung durch Hexenbesen stellen.

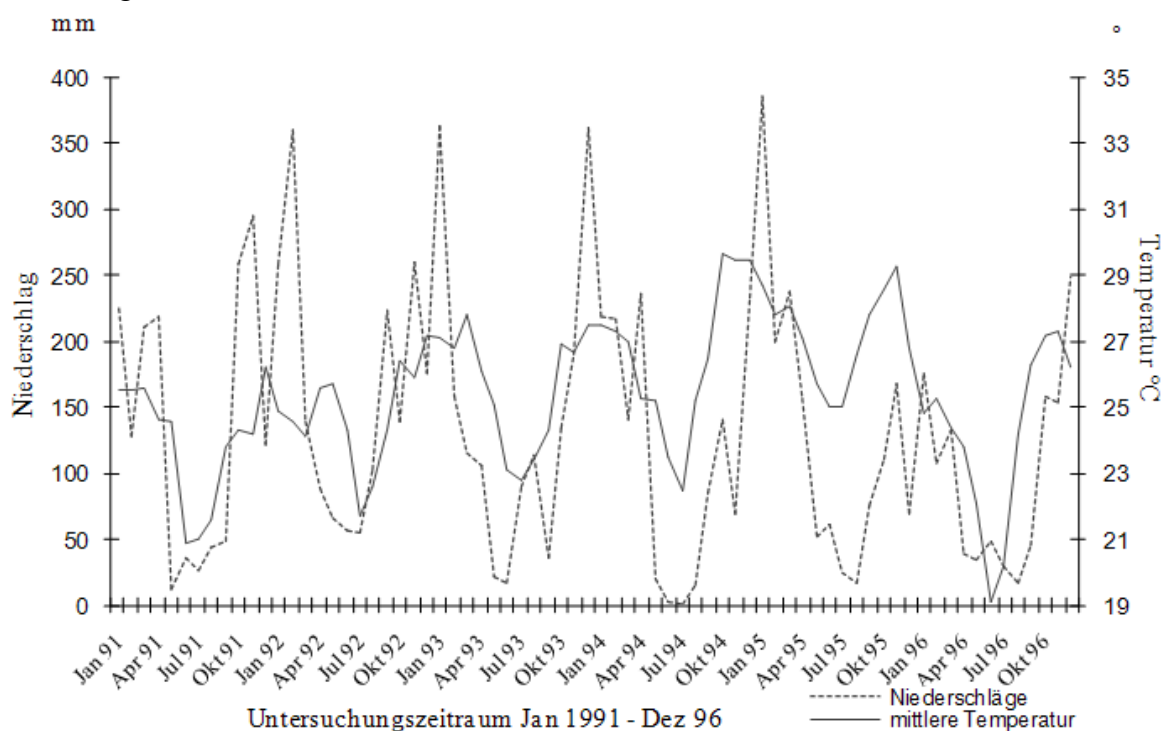


Abb. 3.12: Niederschlag und durchschnittliche monatliche Temperaturwerte von 1991 bis 1996 am Standort Sapecho (Daten Klimastation „EL CEIBO“ – Sapecho)¹⁶

¹⁶ Aus abbildungstechnischen Gründen und zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Werte von 1990 und 1997 nicht mit aufgeführt.

Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung am Standort Sapecho im Jahresverlauf des Untersuchungszeitraumes ist in Abb. 3.12 in Zusammenhang mit den monatlichen mittleren Temperaturen dargestellt.

Die Regenzeit beginnt in den Monaten Oktober/November und endet im Monat April. Der Zeitraum Mai bis September ist gekennzeichnet durch geringe Niederschläge, die im Mittel unter 100 mm/Monat liegen. Der von ZABALLOS (1970) als kritisch betrachtete Wert für Kakao von 60 mm/Monat kann im Alto Beni während mancher Monate unterschritten werden. Durch die niedrigeren Temperaturen während des Süd winters wird die Evapotranspirationsrate herabgesetzt und damit das Wasserdefizit verringert. Dennoch kommt es häufig, zumindest während einiger Wochen, zu einem erheblichen Trockenstress für die Kakaopflanzungen.

1996 führte eine 6-monatige Trockenperiode zwischen April und September zum Austrocknen von Flussläufen sowie zu einer starken Entlaubung der Vegetation. An Standorten mit wenig tiefgründigen Böden und in Hanglagen kam es in diesem Zeitraum sogar zum Vertrocknen von Kakaobäumen.

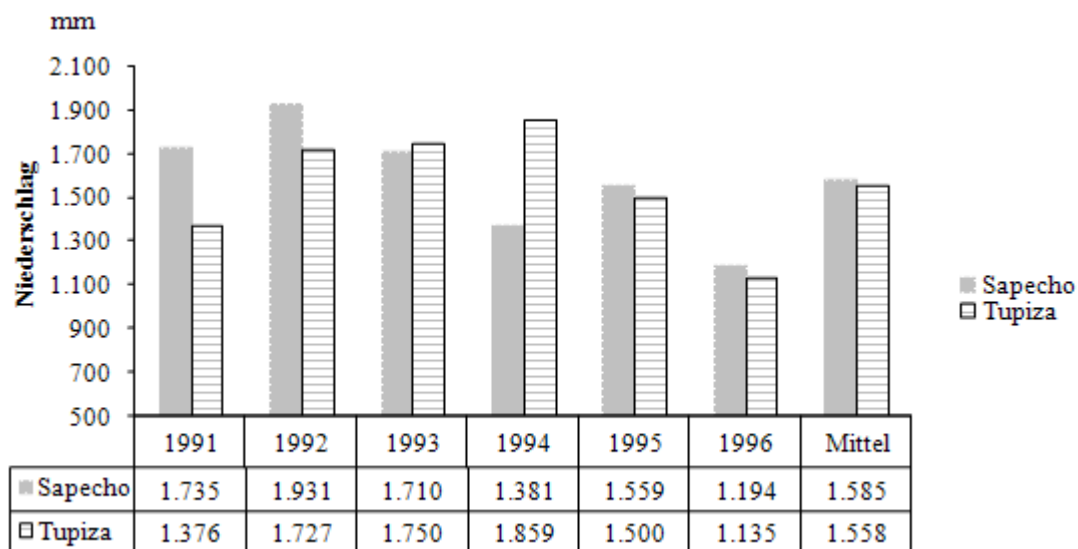


Abb. 3.13: Jahresniederschlagssummen von 1991–97 an den Standorten Sapecho und Tupiza

Aufgrund der starken jahreszeitlichen Niederschlagsschwankungen mit der Gefahr von länger anhaltenden Trockenperioden, muss in der Region Alto Beni bei der Anlage von Dauerkulturen besonders auf Bodenqualität (Wasserspeicherkapazität) sowie auf adäquate Begleitvegetation und permanente Bodenbedeckung durch Mulchmaterial geachtet werden.

Die Jahressummen im Vergleich beider Standorte sind in Abb. 3.13 dargestellt. Die Mittelwerte, bezogen auf den Zeitraum 1991–96, weisen kaum Unterschiede auf, erhebliche Dif-

ferenzen im Niederschlagsregime sind im Jahr 1991 mit 339 mm und 1994 mit 478 mm registriert worden.

Das Jahr 1992 lag mit einer Jahresniederschlagssumme für Sapecho von 1931 mm deutlich über dem langjährigen Mittelwert von 1585 mm, während 1996 mit 1194 mm Niederschlägen die Werte unter dem langjährigen Mittel lagen.

Temperatur

Der Temperaturverlauf in der Region Alto Beni kann extreme Temperaturschwankungen von Maximal- und Minimalwerten aufweisen, wie in Abb. 3.14 anhand der Untersuchungsdaten des Jahres 1996 (Standort Sapecho) dargestellt.

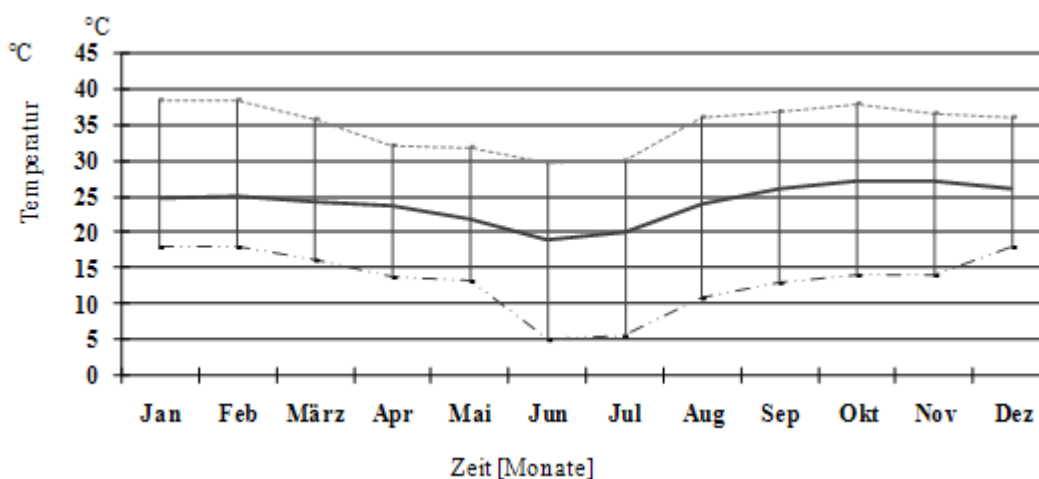


Abb. 3.14: Extreme maximale, minimale und durchschnittliche monatliche Temperaturwerte in Sapecho im Jahr 1996

Die extremen Tiefstwerte von 5,0 und 5,6 °C der Monate Juni und Juli 1996 treten nur während eines relativ kurzen Zeitraumes in den frühen Morgenstunden auf und führen nicht zu einer direkten Schädigung von ausgewachsenen Kakaobäumen. Jungpflanzen in Pflanzgärten werden jedoch meist massiv geschädigt und sterben ab. Die Samenausbildung in jungen Kakaofrüchten kann beeinträchtigt werden (eigene Beobachtungen).

Die niedrigen Temperaturwerte führen zu einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit, die während der Nacht- und Vormittagsstunden Werte von 100 % erreichen. Dies sind ideale Voraussetzung für die Braunfäule von Kakao (*Phytophthora palmivora*). Da diese Witterungsverhältnisse oft während der Reifezeit von Kakao, zwischen den Monaten Juni und September auftreten, ist hier mit massivem Befall von Braunfäule und entsprechenden Ernteverlusten zu rechnen.

Das hohe Niederschlagsdefizit während der Monate Mai bis September wird durch die niedrigen Temperaturen und der damit verbundenen geringen Evapotranspirationswerte teilweise kompensiert. Die großen Schwankungen der Niederschlags- und Temperaturwerte in der Region des Alto Beni sind vermutlich die Ursachen für die ausgeprägten Produktionsschwankungen von Kakao, wie auch im Produktionsjahr 1996 zu beobachten war. Perioden mit Trockenheit während mehrerer Wochen wirken sich dagegen nicht nachteilig auf die Kakaoproduktion aus.

In Abb. 3.12 werden die zyklische Niederschlagsverteilung und der Temperaturverlauf dargestellt. Die Übereinstimmung von Perioden geringer Niederschläge und niedriger Temperaturen geht dabei sehr deutlich hervor. Diese haben entscheidenden Einfluss auf die Wachstumsentwicklung von Kakaobäumen. Sehr deutlich ist die Auswirkung an den extremen Werten des Jahres 1996 zu beobachten. So kam es z. B. während der sehr trockenen und kühlen Monate kaum zu Triebwachstum (Abb. 3.15). Auch die Fruchtkörperbildung von Hexenbesen (Abb. 3.21) war während dieses Zeitraums sehr gering. Die Anzahl der Hexenbeseninfektionen wies im gesamten Trockenjahr 1996 sowohl am Standort Sapecho mit 12,1 Hexenbesenrieben Baum⁻¹ als auch in Tupiza mit 1,0 Hexenbeseninfektionen Baum⁻¹ den niedrigsten Wert während des Untersuchungszeitraumes auf (Tab. 3.9).

3.3.2 Entwicklungszyklus des Kakaobaumes

Die unterschiedlichen Vegetationsphasen des Kakaos wie Triebwachstum (Flushing), Blüte und Fruchtentwicklung werden durch die Witterungsverhältnisse stark beeinflusst. Die Intensität sowie Ausprägung dieser Parameter sind im Jahresablauf unterschiedlich und können ebenso von Vegetationsperiode zu Vegetationsperiode um mehrer Wochen variieren.

Triebwachstum

Über das Jahr verteilt, kommt es zu mehreren Triebwachstumsschüben mit unterschiedlicher Intensität. Ein starker Triebzuwachs ist im Zeitraum März/April, August/September und Dezember/Januar zu beobachten (Abb. 3.15). Das Flushing im Zeitraum zwischen August und September ist meist am intensivsten ausgeprägt. In der kühleren und trockeneren Jahreszeit während der Monate Juni/Juli ist kein oder nur sehr geringes Triebwachstum zu beobachten.

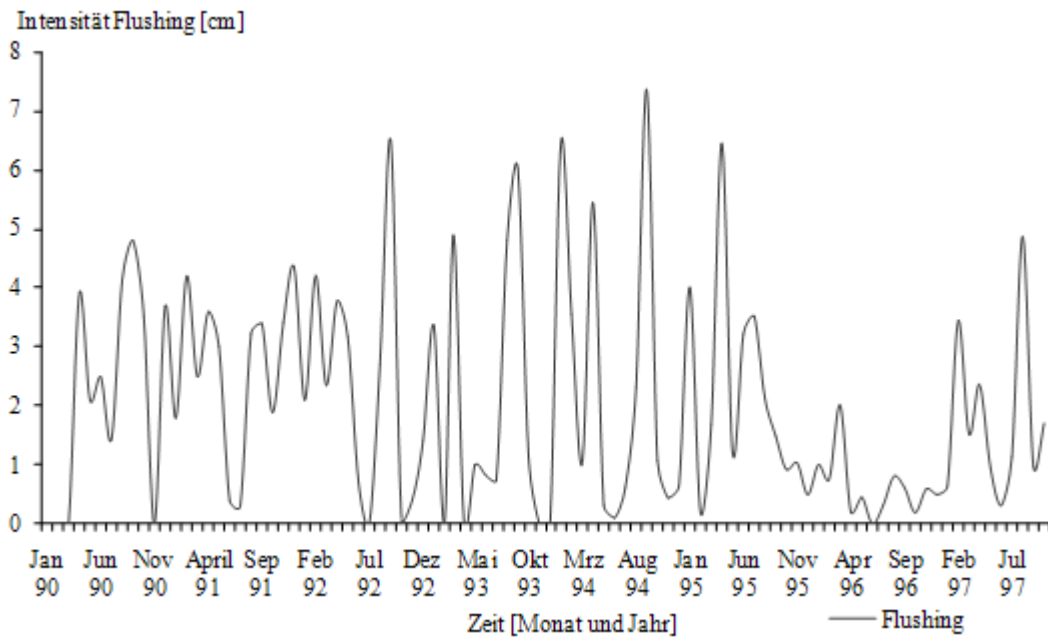


Abb. 3.15: Intensität und Perioden des Triebwachstums von Kakaobäumen von 1990–97 am Standort Sapecho

In Abb. 3.16 wird das durchschnittliche Triebwachstum während des gesamten Untersuchungszeitraumes dem extrem trockenen Jahr 1996 gegenübergestellt, was den Einfluss der Witterungsverhältnisse auf das Kakaowachstum verdeutlicht. Stresssituationen, bedingt durch Wassermangel, verringern generell das vegetative Wachstum (BALASIMHA, 1987).

Triebwachstum kann außer durch den jahreszeitlich bedingten Witterungsverlauf auch durch Pflegemaßnahmen beeinflusst werden. Ein starker Rückschnitt der Kakaobäume löst in der Folge einen anschließenden Triebwachstumsschub aus.

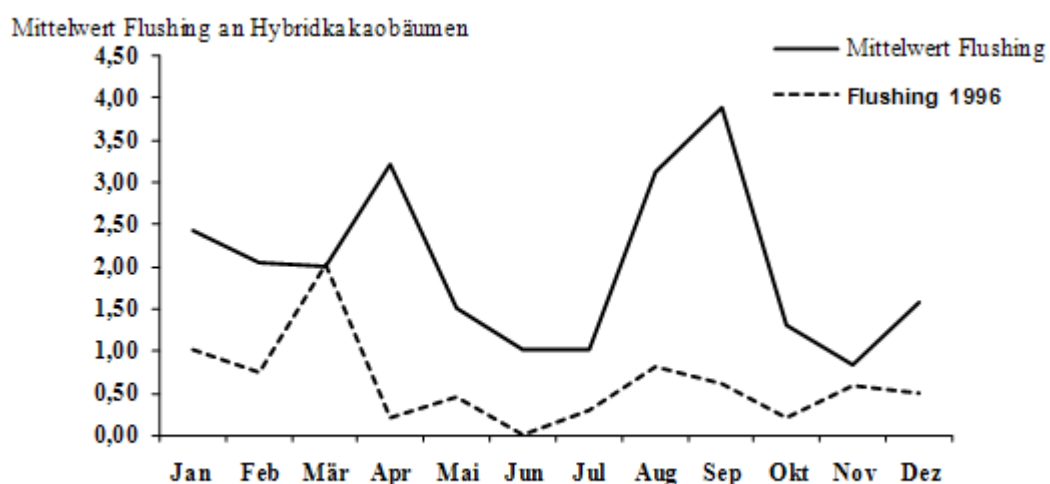


Abb. 3.16: Mittleres Triebwachstum (Flushing) an Hybridkakaobäumen von 1990–97 und Triebwachstumskurve des Trockenjahres 1996 am Standort Sapecho

Ebenso wurde beobachtet, dass ein starker Rückschnitt der Schattenbäume und der damit verbundene erhöhte Lichteinfall das Triebwachstum fördert.

Blüten und Fruchtentwicklung

Die Blüten- und Fruchtentwicklung stehen in direktem Zusammenhang. Aus Abb. 3.17 ist der sehr ähnliche, zeitlich verschobene Kurvenverlauf ersichtlich. Die Werteskala auf der y-Achse gibt die Intensitätsstufe der Blüten- und Fruchtentwicklung an.

Die in Kapitel 2.2.4 beschriebenen klimatischen Einflüsse auf die Blütenbildung werden durch die Untersuchungsergebnisse bestätigt. Während der niederschlagsarmen und kühleren Monate von Mai bis September kommt es meist nur zu einer sehr geringen Blütenausbildung.

Zu Beginn der Regenzeit und mit Anstieg der nächtlichen Temperaturwerte beginnt im Monat Oktober die Phase der Blütenbildung, die bis Ende der Regenperiode und dem Einsetzen kühlerer Nachttemperaturen im Monat Mai anhält.

Vom Zeitpunkt der Befruchtung bis zur Reife der Kakaofrüchte vergehen etwa 5 bis 6 Monate.

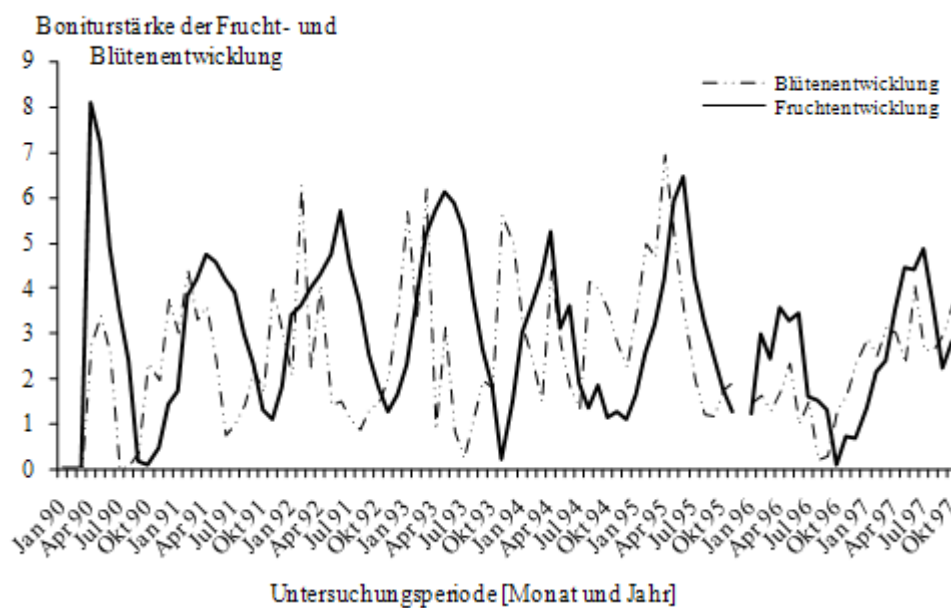


Abb. 3.17: Blüten- und Fruchtentwicklung an Kakaobäumen im Zeitraum 1990–97 am Standort Sapecho

Der Zeitraum der Blütenbildung von 5 bis 7 Monaten entspricht somit dem der Ernteperiode im Alto Beni, die in der Regel von April bis Oktober andauert.

3.3.3 Entwicklungszyklus der Hexenbesenkrankheit

Die vegetative (parasitische) Entwicklungsphase des Hexenbesens wurde an Hybridbäumen beobachtet. Die Beobachtungen der generativen (saprophytischen) Entwicklungsphase des

Hexenbesens erfolgte an den, aus diesen Bäumen stammenden, abgestorbenen Hexenbesen. Sofern keine Angaben über den Untersuchungsstandort gemacht werden, beziehen sich diese auf den Standort Sapecho.

Vegetative Phase

Die Zeitspanne von Beginn der Dehydrierung bis zum vollständigen Vertrocknen des Hexenbesentriebs wurde im Rahmen der Diplomarbeit (MILZ,1993) im Jahr 1990 beobachtet und dokumentiert. Danach beträgt die

- kürzeste Dauer der Nekrotisierung 7 Tage,
- längste Dauer 28 Tage,
- durchschnittliche Dauer 21 Tage.

In der folgenden Darstellung der Untersuchungsergebnisse (Abb. 3.18) wird die Zeitspanne von Beginn der Symptomausbildung bis zur vollständigen Dehydrierung angegeben, da der Absterbeprozess nur eine Zwischenstufe von vegetativer Phase zur Präsporulationsphase darstellt.

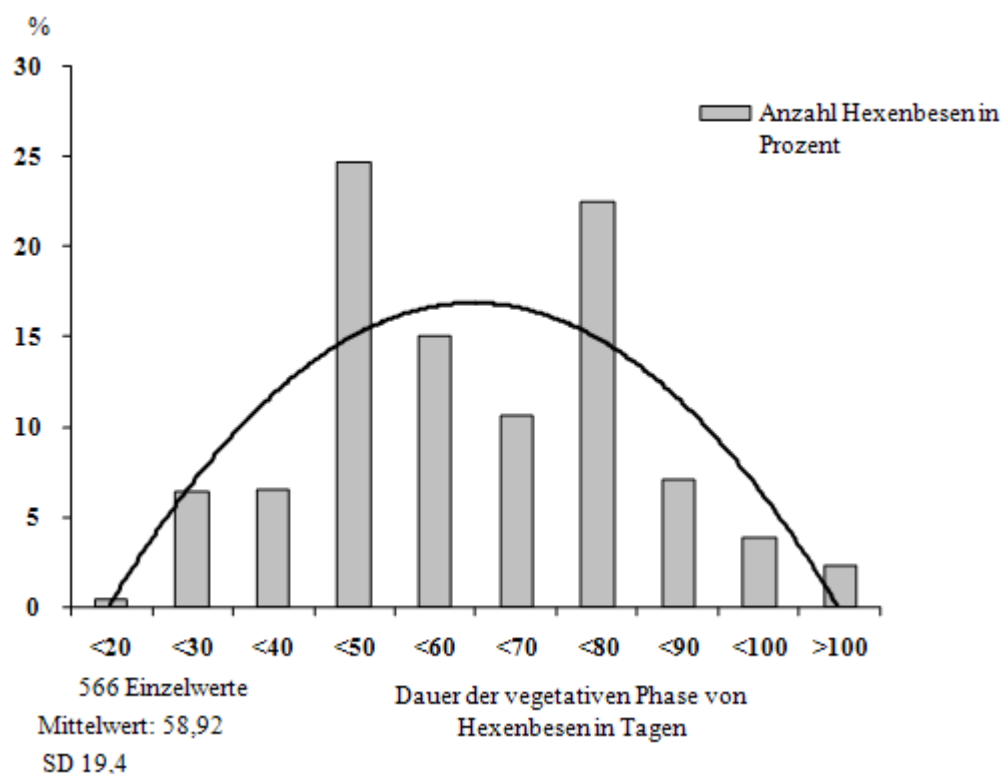


Abb. 3.18: Dauer der vegetativen Phase des Hexenbesens an infizierten Kakaobäumen vom Zeitpunkt der Symptomausbildung bis zur vollständigen Dehydrierung am Standort Sapecho

Die vegetative Phase, eingerechnet den Zeitraum der Dehydrierung, dauerte im Untersuchungszeitraum im Mittel 59 Tage. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung von 19

ergibt sich somit eine Zeitspanne von 40 bis 78 Tagen, die von der Symptomausprägung bis zur vollständigen Dehydrierung vergehen.

Ausgehend von einer Inkubationszeit im günstigsten Fall von 28 Tagen (ARANZAZU, 1981a) beträgt der kürzeste Zeitraum zwischen Infektion und Beginn der Präsporulationsphase etwa 68 Tage. 73 % der Hexenbesen weisen einen vegetativen Zyklus von 50 bis 80 Tagen auf, bis der Prozess der vollkommenen Dehydrierung abgeschlossen ist und die Präfruktifikationsphase beginnt.

Präfruktifikation

Im Zeitraum April 1991 bis Oktober 1997 wurden am Standort Sapecho die Hexenbesen individuell auf ihre Präfruktifikationsphase untersucht. Da die Hexenbesen über einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren ihre Infektionsfähigkeit erhalten können, wurden für die folgenden Auswertungen nur diejenigen Hexenbesen berücksichtigt, die bis Dezember 1994 das erste Mal Fruchtkörper ausgebildet hatten. Abb. 3.19 stellt die Relation der Dauer der Präsporulationsphase eines Hexenbesens und der Gesamtzahl an ausgebildeten Fruchtkörpern dar.

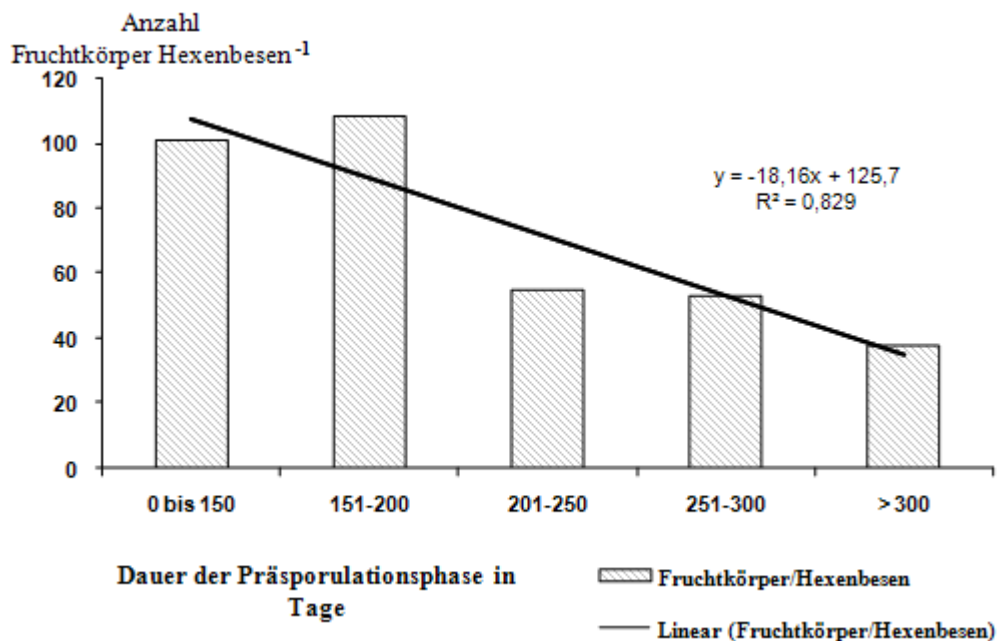


Abb. 3.19: Durchschnittliche Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper von Hexenbesen an Kakaobäumen am Standort Sapecho in Abhängigkeit der Dauer ihrer Präsporulationsphase

Daraus wird ersichtlich, dass mit Zunahme der Dauer der Präsporulationsphase, also dem Zeitpunkt, bis ein Hexenbesen das erste Mal Fruchtkörper ausbildet, die Gesamtzahl an gebildeten Fruchtkörpern abnimmt. Die größte Anzahl an Fruchtkörpern wurde demnach von Hexenbesen mit einer Präsporulationsphase zwischen 150 bis 200 Tagen produziert.

Die Gruppe der Hexenbesen, die im November 1991 den Dehydrierungsprozess und die Präfruktifikationsphase abgeschlossen hatte, war während der Hauptsporulationsphase von Ende Februar bis Mitte April 1992 bereits in der Lage, Fruchtkörper auszubilden. Die hohe Anzahl von durchschnittlich 347 ausgebildeten Fruchtkörpern pro Hexenbesen dieser Gruppe lässt sich damit erklären. Die Hexenbesen, die im Laufe des Jahres 1995 nekrotisierten, kamen aufgrund der außergewöhnlichen Trockenheit 1996 bis zur Beendigung der Datenerfassung für diese Arbeit im Dezember 1997 nicht mehr zur Sporulation.

Aus Abb. 3.19 wird ersichtlich, dass die Hexenbesen, die im Zeitraum Oktober bis Januar den Dehydrierungsprozess abschließen, häufig bereits während der Folgemonate Fruchtkörper ausbilden können. Die Hexenbesen, deren Dehydrierung in die Hauptsporulationszeit von Januar bis April fällt, bilden aufgrund der zuerst notwendigerweise zu durchlaufenden Präsporulationsphase meist erst im Folgejahr Fruchtkörper aus.

Die längste Präsporulationsphase wurde bei einem Hexenbesen beobachtet, der am 1.6.1993 die Nekrotisierungsphase abgeschlossen hatte und erst am 21.11.1994 die ersten Fruchtkörper ausbildete. Hier betrug die Präsporulationsphase 538 Tage.

Der kürzeste Zeitraum zwischen Nekrotisierung und Sporulation betrug 53 Tage und wurde an einem Hexenbesen registriert, der am 31.12.91 den Dehydrierungsprozess abgeschlossen hatte und bereits am 22.2.92 die ersten Fruchtkörper ausbildete. Rechnet man dazu 28 Tage für die Inkubationszeit sowie 43 Tage für den kürzesten Zeitraum der vegetativen Phase (58,92 Tage – Standardabweichung von 19,4 Tagen) so ergeben sich 124 Tage für den kürzesten Zeitraum zwischen Infektion und Reproduktion. Dies entspricht, wie in Kapitel 2.2.3 bereits dargestellt, der von ARANZAZU (1981a) berichteten kürzesten Dauer der Infektion bis zur Reproduktion von Hexenbesen in Urubá/Kolumbien von 119 Tagen (MILZ, 1993).

Generative Phase

Da die generative Phase der Hexenbesen mehr als 24 Monate betragen kann und die Beobachtungen bis Ende 1997 beendet werden sollten, wurden diese Untersuchungen an Hexenbesen durchgeführt, die bis Dezember 1995 die Dehydrierungsphase abgeschlossen hatten.

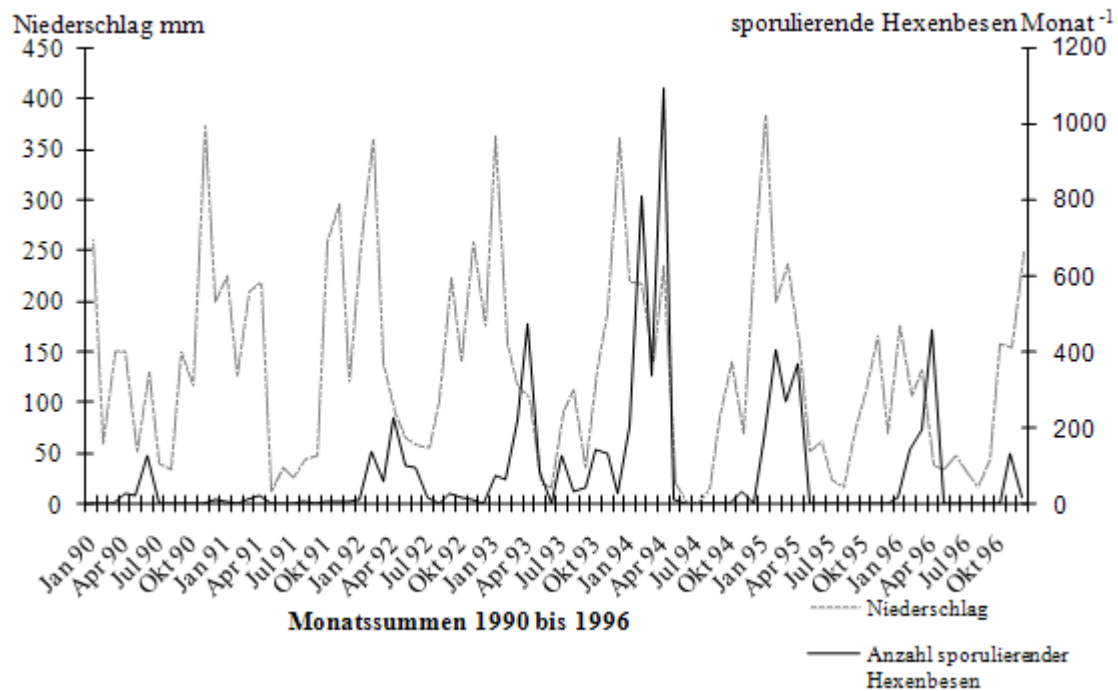


Abb. 3.20: Durchschnittliche Anzahl sporulierender Hexenbesentriebe im Untersuchungszeitraum 1990–96 im Jahresverlauf und mittlere Niederschlagswerte am Standort Sapecho

Die Hauptsporulationszeit beginnt während der Regenperiode in den Monaten Januar bis April (Abb. 3.20 und 3.21). Vereinzelt Fruchtkörper können das ganze Jahr über gebildet werden, sie sind dann häufig sehr klein oder werden zum Teil gar nicht richtig ausgeformt. Die geringe Anzahl an Infektionen von Kakaotrieben deutet dabei auch darauf hin, dass es während dieser Phasen nur zu einer geringen Sporenbildung kommt bzw. die Prädisposition der Pflanzen für eine Infektion sehr gering ist. Ist der Reproduktionsprozess einmal in Gang gekommen, dann reichen auch geringere Niederschlagsmengen aus, um Fruchtkörper auszubilden.

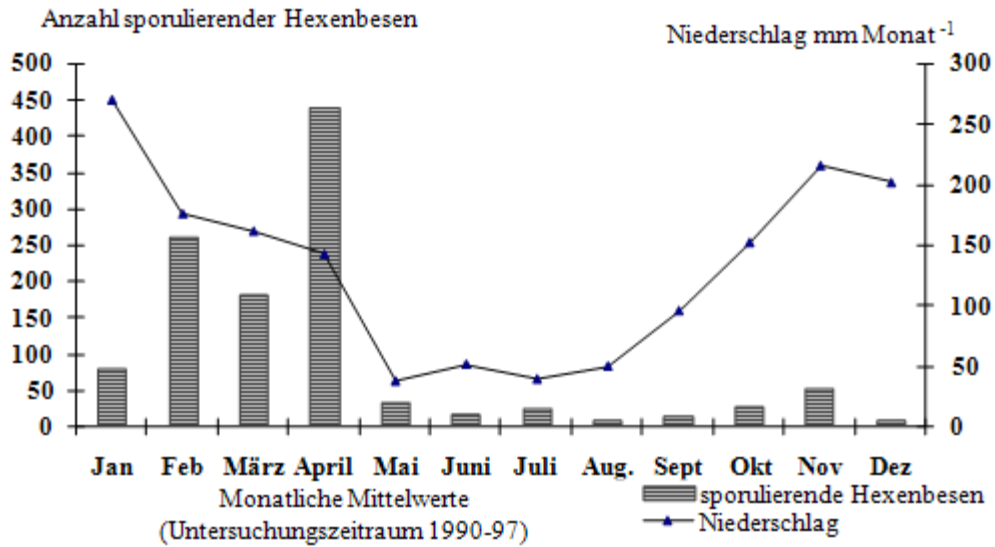


Abb. 3.21: Durchschnittliche monatliche Anzahl sporulierender Hexenbesentriebe und Niederschläge im Zeitraum 1990–97 am Standort Sapecho

Erwähnenswert ist, dass die Fruchtkörperbildung häufig schubartig erfolgt. Das heißt, dass nach entsprechenden Witterungsbedingungen eine große Anzahl von Hexenbesen Fruchtkörper produzieren, diese dann verwittern und erst nach einigen Tagen erneut Fruchtkörper ausgebildet werden. Es findet also keine kontinuierliche Fruchtkörperbildung an Hexenbesen statt. In Tab. 3.4 werden die Untersuchungsergebnisse an Hexenbesen zusammenfassend dargestellt.

Tab. 3.4: Untersuchungsergebnisse an Hexenbesen von April 1990 bis Oktober 97

Anzahl untersuchter sporulationsfähiger Hexenbesen	1987
Anzahl sporulierender Hexenbesen im Untersuchungszeitraum	1407 (70,08%)
Maximale Anzahl von Sporulationsereignissen pro Hexenbesen	19
Durchschnittliche Anzahl an Sporulationsereignissen	6,32
Maximale Anzahl Fruchtkörper/Sporulationsereignis/Hexenbesen	391
Maximale Anzahl gebildeter Fruchtkörper während des gesamten Reproduktionszyklus eines Hexenbesens	576
Durchschnittliche Anzahl gebildeter Fruchtkörper pro Hexenbesen während des Untersuchungszeitraumes	45,53
Mittelwert der Sporulationsfähigkeit von Hexenbesen in Tagen (614 Einzelwerte)	413
Standardabweichung	179
Maximale Dauer der Sporulationsfähigkeit von Hexenbesen in Tagen	945

Die angegebenen Durchschnittswerte bzw. Maximalwerte einzelner Hexenbesen können in Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse von Jahr zu Jahr stark variieren. Die durchschnittliche Dauer der Infektionsfähigkeit der untersuchten Hexenbesen betrug am Standort Sapecho knapp 14 Monate. Einzelne Hexenbesen können bis zu einem Zeitraum von über 31 Monaten Fruchtkörper ausbilden, sofern sie in der Baumkrone verbleiben. Abb. 3.22 zeigt die durchschnittliche Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper an Hexenbesen pro Sporulationsereignis während des Untersuchungszeitraumes November 1991 bis Dezember 1997. Die höchste durchschnittliche Anzahl an Fruchtkörpern je Hexenbesen pro Sporulationsereignis wurde über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg immer in den

Monaten März und April beobachtet. April ist auch der Monat mit der höchsten Anzahl an sporulierenden Hexenbesen. Die durchschnittlichen Niederschlagswerte im Monat April kennzeichnen zwar mit 142 mm den Übergang zum niederschlagsarmen Südwinter, aufgrund der vorausgegangenen niederschlagsreichen Monate reichen aber bereits relativ geringe Regenfälle aus, um Fruchtkörperbildungen an Hexenbesen hervorzurufen.

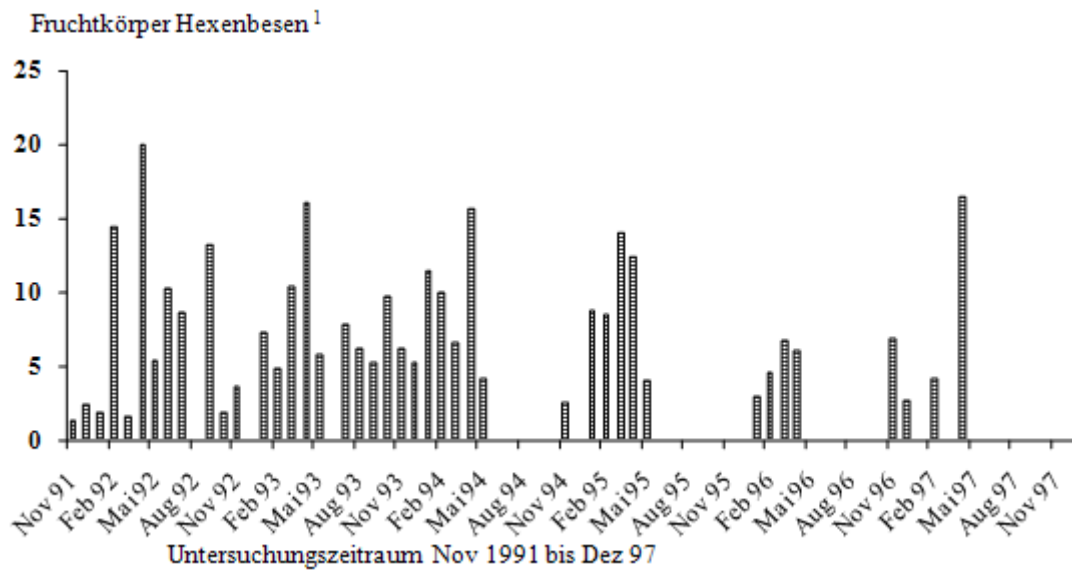


Abb. 3.22: Anzahl durchschnittliche ausgebildeter Fruchtkörper von Hexenbesentrieben pro Sporulationsereignis am Standort Sapecho in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Infektion

Die Infektion der Kakaopflanze mit Hexenbesen ist abhängig von der Präsenz infektiöser Sporen in der Luft und von der Prädisposition der Pflanze für eine Erkrankung.

Da *Crinipellis* ausschließlich meristematisches Pflanzengewebe infizieren kann, ist anzunehmen, dass das Infektionsrisiko für Kakao dann besonders groß ist, wenn Phasen des aktiven Pflanzenwachstums an Trieben, Blüten oder Früchten stattfinden.

Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse zum Reproduktionszyklus des Hexenbesen

Die Anzahl von Hexenbesensymptomen an Hybridkakaobäumen wurde nach dem linearen Modell an Hand der multiplen Varianzanalyse verrechnet (Steel, Torrie & Dickey, 1997). Die multiplen Mittelwertvergleiche erfolgten unter Anwendung von LSMEANS (SAS Institute Inc, 2004). Folgende Variablen wurden für die Berechnungen berücksichtigt:

- Anzahl von Kakaotrieben mit Hexenbesensymptomen
- Monat und Jahr
- Niederschlag mm*Monat⁻¹
- Wert Flushing
- Anzahl Fruchtkörper an abgestorbenen Hexenbesen

Tab. 3.5: Beschreibung der Faktoren

Varianzursache	Nivel	Beschreibung
Standort	2	Tupiza, Sapecho
Jahr	5	1992, 1993, 1994, 1995, 1996
Monat	12	Januar bis Dezember
Stichprobe	10	Hybridbäume pro Standort

Daraus ergibt sich das Modell: $\eta_{ijk} = \log E(Y_{ijk}) = \eta + \rho_i + \tau_j + \rho\tau_{ij} + \alpha_{ijk}$

η_{ijkl} : allgemeiner Wert der Anzahl an Kakaotrieben mit Hexenbesenssymptomen an der k-ten Pflanze, untersucht im i-ten Jahr und am j-ten Standort

η : Konstante oder allgemeiner Mittelwert

ρ_i : fixer Effekt im i-ten Jahr

τ_j : fixer Effekt am j-ten Standort

$\rho\tau_{ij}$: fixer Effekt im i-ten Jahr und am j-ten Standort

Die Ausprägung von Hexenbesenssymptomen an Kakaotrieben wurden einfach korreliert mit den Variablen Monat, Jahr, Temperatur, Niederschlag ($\text{mm} \cdot \text{Monat}^{-1}$), Wert Flushing und Anzahl Fruchtkörper. An Hand der multiplen Regressionsanalyse wurden diejenigen Variablen unter Anwendung der schrittweisen Diskriminanzanalyse (Stepwise) untersucht, die Auswirkungen auf die Infektion von Kakaotrieben mit Hexenbesen haben (SAS Institute Inc, 2004).

Aus der beschreibenden Darstellung in Tab. 3.6 wird die sehr hohe Standartabweichung (SD) und Variationskoeffizient (CV) der Untersuchungsergebnisse ersichtlich.

Tab. 3.6: Untersuchte Variable in Bezug auf Ausbildung von Hexenbesenssymptomen an Kakaotrieben (n=60)

Varianzursache	Mittelwert	SD	CV (%)	Min.	Máx.
Temperatur °C	25.7	2.2	8.67	19.1	29.7
Niederschlag ($\text{mm} \cdot \text{Monat}^{-1}$)	129.6	97.7	75.43	1	386.4
Wert Flushing	1.9	2.0	106.11	0	7.36
Anzahl Hexenbesentriebe an Kakao	47.8	118.7	248.16	1	876
Anzahl Fruchtkörper*Hexenbesen ⁻¹	4.9	5.2	105.54	0	20.1

Das Verhalten der untersuchten Variablen lässt sich durch die starke saisonale Abhängigkeit der Witterungsfaktoren sowie der davon abhängigen physiologischen Parameter der Kakao-pflanze sowie der Entwicklung des Hexenbesenpilzes erklären. Erwartungsgemäß weisen lediglich die Temperaturwerte nur geringe Abweichungen vom Mittelwert auf.

Tab. 3.7: Matrix der Koeffizienten einfach linearer Korrelation und Irrtumswahrscheinlichkeiten

Varianzursache	Monat	Jahr	Temperatur °C	Niederschlag (mm*Monat ⁻¹)	Wert Flushing	Hexenbesen- symptome an Kakaotrieben
Temperatur °C	0.17325ns 0.1856	0.03257ns 0.8049				
Niederschlag (mm*Monat ⁻¹)	-0.15977ns 0.2227	-0.19761ns 0.1302	0.44679** 0.0003			
Wert Flushing	-0.26548* 0.0404	-0.21552ns 0.0982	0.07721ns 0.5577	0.21498ns 0.099		
Hexenbesensymp- tome an Kakaotrie- ben	-0.06029ns 0.6472	0.08951ns 0.4964	-0.03889ns 0.768	-0.16604ns 0.2048	0.21486ns 0.0992	
Anzahl Fruchtkör- per*Hexenbesen	-0.4545** 0.0003	-0.31981* 0.0127	0.10355ns 0.4311	0.39075** 0.002	0.38717** 0.0022	-0.0509ns 0.6993

**: Signifikanz P: 0.01

*: Signifikanz P: 0.05

ns: nicht signifikant bei P: 0.05

Wie in Tab. 3.7 dargestellt besteht eine signifikante Korrelation zwischen Temperatur und Niederschlag (siehe auch Abb. 3.12).

Die Ausbildung von Fruchtkörpern an abgestorbenen Hexenbesentrieben korreliert signifikant mit den Variablen Monaten, Jahren und Niederschlag. Während der ersten Untersuchungsjahre war die Ausbildung von Fruchtkörpern an Hexenbesentrieben höher als gegen Ende des Untersuchungszeitraumes.

Die Ausprägung von Triebwachstumsschüben (Wert Flushing) korreliert negativ im Jahresverlauf (Monat), zu Beginn des Jahres ist im Mittel ein stärkeres Triebwachstum zu beobachten als gegen Ende des Jahres. Die Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper korreliert positiv mit der Höhe der Niederschläge.

Eine Korrelation zwischen Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper an Hexenbesentrieben und Hexenbesenbefall von Kakaotrieben konnte überraschenderweise nicht festgestellt werden. Aufgrund der Zeitspanne zwischen Infektion von meristematischem Kakaogewebe und Symptomausprägung (Kapitel 2.2.3), die u.U. mehrer Monate betragen kann, wurden Berechnungen durchgeführt, die die Symptomausprägung von Hexenbesen an Trieben nach 1, 2, 3, .. bis einschließlich 12 Monate nach Auftreten von Fruchtkörperbildungen untersuchten. Es konnten jedoch auch bei diesen Untersuchungen keine signifikanten Korrelationen zwischen

der Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper (Inokulum) an abgestorbenen Hexenbesen und Hexenbesenbefall an Kakaotrieben festgestellt werden.

Vergleich der Standorte Sapecho und Tupiza in Bezug auf Hexenbesenbefall an Kakaotrieben

Die Anzahl von Hexenbesentrieben an den untersuchten Hybridbäumen an den Standorten Sapecho und Tupiza ergab signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungsjahren und zwischen den Standorten (s. Tab. 3.8). Weiterhin besteht eine signifikante Interaktion zwischen Standort und Jahren. Die Intensität der Ausprägung von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben wird demnach sowohl durch die Jahre als auch durch den Standort determiniert

Tab. 3.8: Test nach „Wald“ für die Anzahl von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben

Varianzursache	FG	Chi quadrat	Pr> Chi quadrat
Jahr	4	239.16	<.0001
Standort	1	483.94	<.0001
Jahr*Standort	4	318.53	<.0001

Am Standort Sapecho war der Befall von Hexenbesen an Kakaotrieben in jedem Untersuchungsjahr signifikant höher als am Standort Tupiza.

Der Vergleich der Befallshöhe innerhalb eines Standortes während des Untersuchungszeitraumes zeigt im Fall von Sapecho signifikante Unterschiede zwischen jedem Untersuchungsjahre, während am Standort Tupiza zwischen den Jahren 1992 und 1995 sowie 1993 und 1994 keine Signifikanz in der Befallsintensität festgestellt werden konnte.

Tab. 3.9: Mittelwertvergleich von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben zwischen den Untersuchungsjahren und zwischen den Standorten Sapecho und Tupiza

Jahr	Standort			
	Sapecho		Tupiza	
1992	34.5	a	7.6	b
1993	41.9	a	12.1	b
1994	23.0	a	15.2	b
1995	176.2	a	7.8	b
1996	12.1	a	1.0	b

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb einer Zeile sind nicht signifikant verschieden nach LS Means (P: 0.01)

Jahr	Standort			
	Sapecho		Tupiza	
1992	34.5	c	7.6	b
1993	41.9	b	12.1	a
1994	23.0	d	15.2	a
1995	176.2	a	7.8	b
1996	12.1	e	1.0	c

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb einer Spalte sind nicht signifikant verschieden nach LS Means (P: 0.05)

Abb. 3.23 zeigt den Vergleich des Hexenbesenbefalls an beiden Standorten. Dabei wird deutlich, dass am Standort Tupiza die Intensität der Ausbildung von Hexenbesen an Kakaotrieben zu 94,59% vom Untersuchungszeitraum (Jahr) determiniert wird.

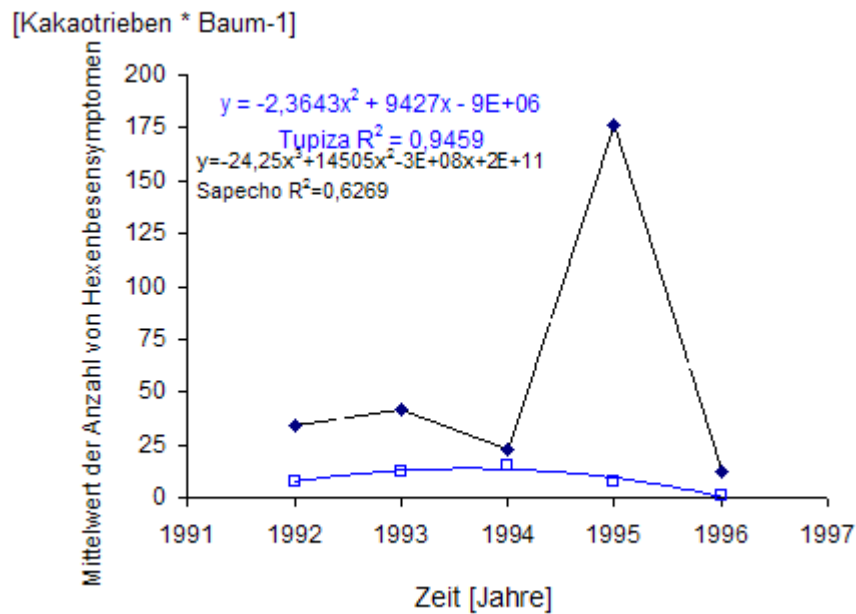


Abb. 3.23: Vergleich des Hexenbesenbefall an Kakaotrieben von Hybridbäumen an den Standorten Sapecho und Tupiza im Zeitraum 1992 bis 1996

Am Standort Sapecho ist die Intensität des Hexenbesenbefalls von Kakaotrieben hingegen mit $R^2 = 0,6269$ nur gering jahresbedingt determiniert. In diesem Zusammenhang muss der extrem hohe Hexenbesenbefall des Jahres 1995 am Standort Sapecho untersucht und diskutiert werden (s. Kapitel 4.2.2).

Die Fruchtkörperbildung an abgestorbenen Hexenbesentrieben war am Standort Sapecho mit Ausnahme des Jahres 1996 sehr viel höher als am Standort Tupiza



Abb. 3.24: Mittelwert der Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper \cdot Hexenbesen $^{-1}$ an den Standorten Sapecho und Tupiza im Zeitraum 1992–96

Die multiple Regressionsanalyse ergibt für die Variablen Niederschlag und Wert Flushing signifikanten Einfluss auf die Variable Symptomausbildung von Hexenbesen an den untersuchten Hybridkakaobäumen.

Tab. 3.10: Varianztabelle zur Schätzung des Regressionskoeffizienten und Untersuchung des Einflusses der Parameter Niederschlag und Wert Flushing auf die Symptomausbildung von Hexenbesen in der untersuchten Stichprobe

Varianzursache	GL	Coeficientes	Standardfehler	t	Pr> t	Inferior 95%	Superior 95%
Intercept	1	53.45999	26.75502	2	0.0505		
Niederschlag	1	-0.27026	0.15685	-1.72	0.0903		
Wert Flushing	1	15.59128	7.66422	2.03	0.0466	0.2430	30.9386

$$\text{Model: } Y_i = 53.46 - 0.27026 \cdot X_i + 15.5913 \cdot W_i + e_i$$

Y_i : Hexenbesensymptome an Kakaotrieben

X_i : Niederschlag (mm*Monat⁻¹)

W_i : Wert Flushing

e_i : Residuum

$\approx DNI(0, \sigma_e^2)$

Aus der Tab. 3.10 wird ersichtlich, dass eine geringe, wenn auch signifikante Korrelation ($P < 0,05$) zwischen der Anzahl ausgebildeter Hexenbesenatrieben und der Intensität des Flushing besteht. Jede Erhöhung des Flushing um eine Einheit führt in der untersuchten Stichprobe im Mittel zu einer Zunahme von Hexenbeseninfektionen um 15,59.

Das Konfidenzintervall von 0,2439 und 30,9386 kann in Zusammenhang mit der großen genetische Variabilität der untersuchten Kakaoklone und mit anderen, nicht berücksichtigten Variablen (Bodenverhältnisse, Standort der einzelnen Kakaobäume, Beschattung etc.) stehen. Bei der Interpretation der statistischen Auswertung von Feldversuchen in Dauerkulturen (bei denen es sich zudem um Ertragspflanzungen handelt) muss daher immer auch berücksichtigt werden, dass neben den untersuchten Variablen eine Vielzahl weiterer Faktoren Einfluss auf das Ergebnis haben können.

3.3.4 Anfälligkeit der Klone auf Hexenbesenbefall

Die log-transformierten Residuen der Daten sind normalverteilt und erfüllen damit die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse¹⁷.

Die Varianzanalysentabelle 3.11 zeigt statistisch signifikante Unterschiede der Klone in Bezug auf Hexenbesenbefall sowie signifikante jahresbedingte Differenzen.

Tab. 3.11: Varianzanalysentabelle für Klone, Behandlungseffekte und Jahre sowie Interaktionen in Bezug auf Hexenbesenbefall an untersuchten Kakaoklonen am Standort Sapecho

Varianzursache	F Wert	Pr > F ¹⁸
Klone	44,07	< .0001 **
Behandlung	0,87	0.4869
Klone x Behandlung	0,91	0.5615
Jahr	539,32	< .0001 **
Klone x Jahr	13,98	< .0001 **
Behandlung x Jahr	2,32	0.0076 **
Klone x Behandlung x Jahr	0,54	0.9943

**Signifikanz bei $P < 0.1$

Die in Abb. 3.25 und 3.26 dargestellten Werte geben die durchschnittliche Anzahl der gesamten registrierten Triebinfektionen mit Hexenbesen eines Kakaoklones im Untersuchungszeitraum an, ohne Berücksichtigung von Schnittmaßnahmen. Die Klone ICS-1 (Clone 2) sowie TSH-565 (Clone 3) weisen einen signifikant höheren Befall gegenüber Hexenbeseninfektionen im Vergleich zu den übrigen untersuchten Klonen auf.

¹⁷ Durchgeführt wurden Goodness-of-Fit Tests for Normal Distribution

Kolmogorov-Smirnov D 0.05095697 Pr > D <0.010

Cramer-von Mises W-Sq 0.43300655 Pr > W-Sq <0.005

Anderson-Darling A-Sq 3.09080472 Pr > A-Sq <0.005

¹⁸ Pr > F = Irrtumswahrscheinlichkeit. Gibt die Wahrscheinlichkeit (Signifikanz) eines Behandlungseffektes an

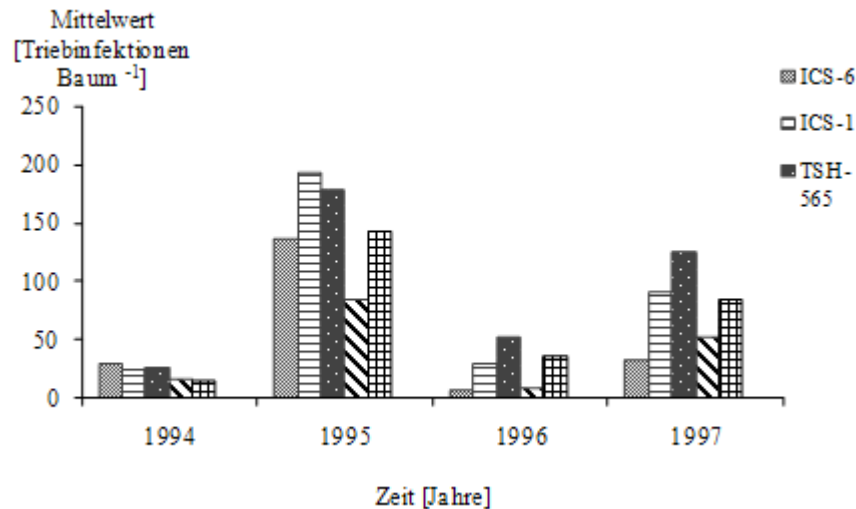


Abb. 3.25: Gesamtzahl an Triebinfektionen mit Hexenbesen im Untersuchungszeitraum 1994–97 an 5 Kakaoklonen (Mittelwert/Baum) am Standort Sapecho

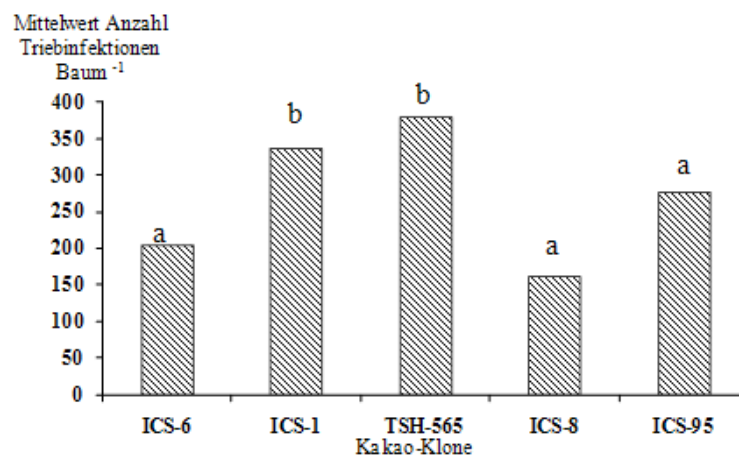


Abb. 3.26: Durchschnittliche Anzahl an Hexenbeseninfektionen pro Baum an 5 Kakaoklonen im Zeitraum 1994–97 am Standort Sapecho

(Balken die mit gleichen Buchstaben gekennzeichnet sind weisen keine statistischen Unterschiede bei $p: 0,05$ auf)

Zwischen den Klonen ICS 6, ICS 8 und ICS 95 bestehen keine statistisch abgesicherten Unterschiede (Tab 3.12). Die Unterschiede der Befallsintensität von Hexenbeseninfektionen im Jahresvergleich sind signifikant (Tab. 3.11). Wie schon oben anhand der untersuchten Hybridbäume dargestellt, wurde auch bei den untersuchten Klonen 1995 ein außergewöhnlicher Anstieg an Triebinfektionen registriert.

Tab. 3.12: Vergleich der untersuchten Klone auf Anfälligkeit für Hexenbesenbefall nach dem Tukey Test (Differences of Least Squares Means)

3 – Eigene Untersuchungen: Ergebnisse

Effect	Clone	_Clone	Adjustment	Adj P	Alpha	Lower	Upper
Clone	1	2	Tukey	<.0001**	0.05	0.5517	0.9318
Clone	1	3	Tukey	<.0001**	0.05	0.6488	1.0290
Clone	1	4	Tukey	0.1211	0.05	0.04081	0.4210
Clone	1	5	Tukey	0.3253	0.05	-0.3719	0.008265
Clone	2	3	Tukey	0.8483	0.05	-0.09293	0.2872
Clone	2	4	Tukey	<.0001**	0.05	-0.7010	-0.3208
Clone	2	5	Tukey	<.0001**	0.05	-1.1137	-0.7335
Clone	3	4	Tukey	<.0001**	0.05	-0.7981	-0.4179
Clone	3	5	Tukey	<.0001**	0.05	-1.2108	-0.8307
Clone	4	5	Tukey	0.0004**	0.05	-0.6028	-0.2226

** kennzeichnet Signifikanz bei $P < 0.1$

3.3.5 Einfluss von Schnittmaßnahmen auf Hexenbesenbefall

Wie die Untersuchungsergebnisse in Abb. 3.27 zeigen, ist der Einfluss unterschiedlicher Schnittfrequenzen auf Hexenbesenbefall an den untersuchten Klonen gering. Auch die Varianztabelle (Tab. 3.13) weist keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen auf.

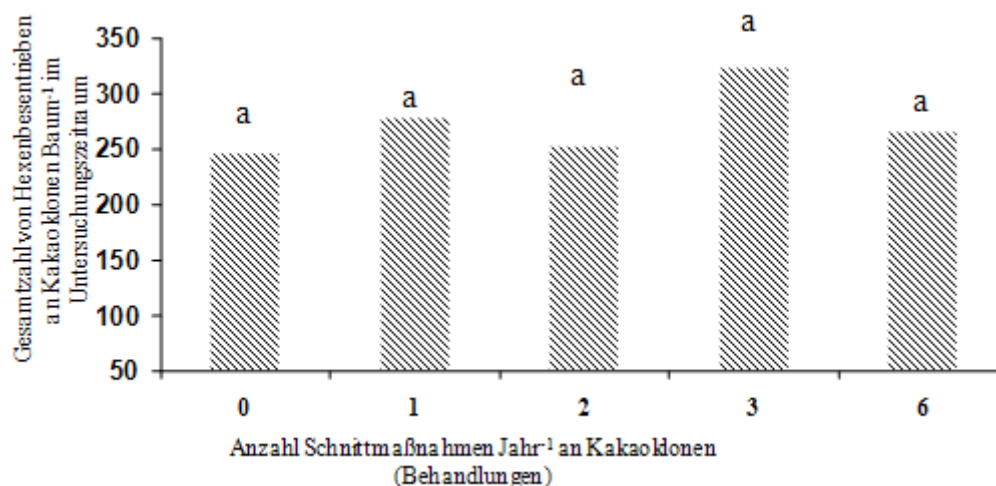


Abb. 3.27: Einfluss von Schnittmaßnahmen auf Triebinfektionen mit Hexenbesen an Kakaoklonen während des Untersuchungszeitraumes 1994–97 am Standort Sapecho

(Balken mit gleichen Buchstaben sind statistisch nicht unterschiedlich bei $P < 0.01$)

Die Auswertung der Ergebnisse (Tab. 3.13) zeigt zudem jahresbedingte Unterschiede in Bezug auf die Hexenbesenanfälligkeit der Klone sowie signifikante Unterschiede der Wirkung

der Behandlungen im Jahresvergleich. Wechselwirkungen in Bezug auf Klone, Behandlung und Jahren bestehen nicht.

3.3.6 Einfluss von Schnittmaßnahmen auf den Ertrag

Da die untersuchten Kakaoklone sich während des Untersuchungszeitraumes noch in der Entwicklungsphase befanden, kann bezüglich der Ertragsleistung noch nicht von einer konsolidierten Situation ausgegangen werden. Die in Abb. 3.28 aufgeführten jährlichen Ertragswerte von frischen Kakaosamen zeigen, dass die Kakaoerträge im Jahresvergleich großen Schwankungen unterliegen.

Tab. 3.13: Varianzanalysetabelle für Behandlungseffekte in Bezug auf Ertrag an untersuchten Kakaoklonen am Standort Sapecho

Varianzursache	F Wert	Pr > F [#]
Klone	18.85	< .0001 *
Behandlung	2.06	0.0916
Klone x Behandlung	0.81	0.6699
Jahre	23.87	< .0001 *
Klone x Jahre	5.71	< .0001 *
Behandlung x Jahre	0.80	0.6491
Klone x Behandlung x Jahre	1.13	0.2631

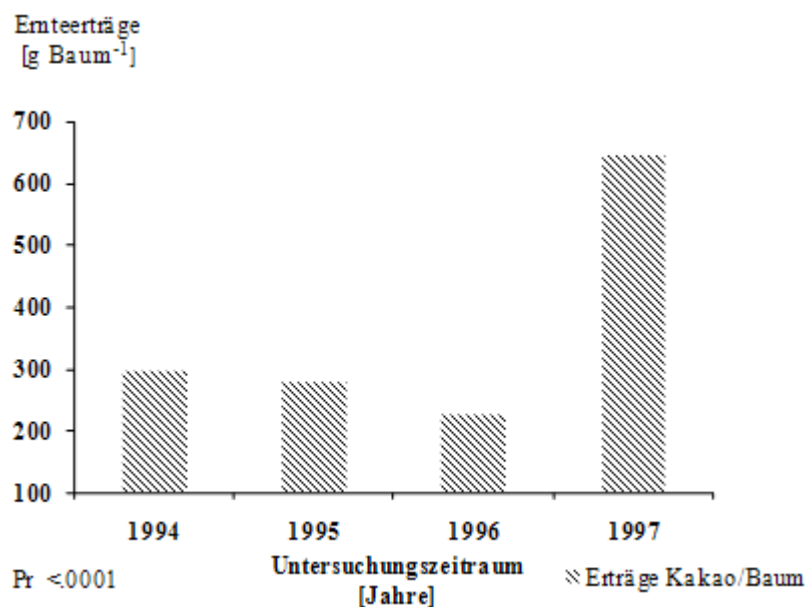


Abb. 3.28: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Ertragsleistung von fünf Kakaoklonen (g/frische Kakaosamen) von 1994–97 am Standort Sapecho

[#] Pr > F = Irrtumswahrscheinlichkeit. Gibt die Wahrscheinlichkeit (Signifikanz) eines Behandlungseffektes an

Die in Abb. 3.28 dargestellten durchschnittlichen jährlichen Ernteergebnisse der Klone zeigen für das Jahr 1996 einen deutlich geringeren Wert als für die Vorjahre, obwohl die Klone in ihrer Ertragsentwicklung noch nicht im Vollertrag standen und somit von Jahr zu Jahr einen Ertragszuwachs aufweisen sollten. Der etwas geringe Wert von 1995 gegenüber dem Vorjahr steht möglicherweise auch in Zusammenhang mit dem extremen Hexenbesenbefall, der 1995 registriert wurde. Normalerweise ist während der Entwicklungsphase von Kakaobäumen eine jährliche Zunahme der Erträge zu beobachten. Daher ist der niedrige Wert für 1996 von 227 g/Baum mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die extremen Witterungsbedingungen zurückzuführen. Im Jahr 1997, das im Bereich der durchschnittlichen Niederschlagswerte lag, stieg der Ertrag im Vergleich zu den Vorjahren mit 645 g/Baum stark an.

Die Ertragsunterschiede zwischen den Jahren sind statistisch hochsignifikant ebenso wie die einzelnen Klone signifikante Unterschiede in ihrer Ertragsleistung im Jahresvergleich aufweisen (Abb. 3.29). Die unterschiedlichen Behandlungen hatten keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag der Klone (Tab. 3.13).

In Abb. 3.29 wird der durchschnittliche jährliche Ertrag der untersuchten Klone dargestellt.

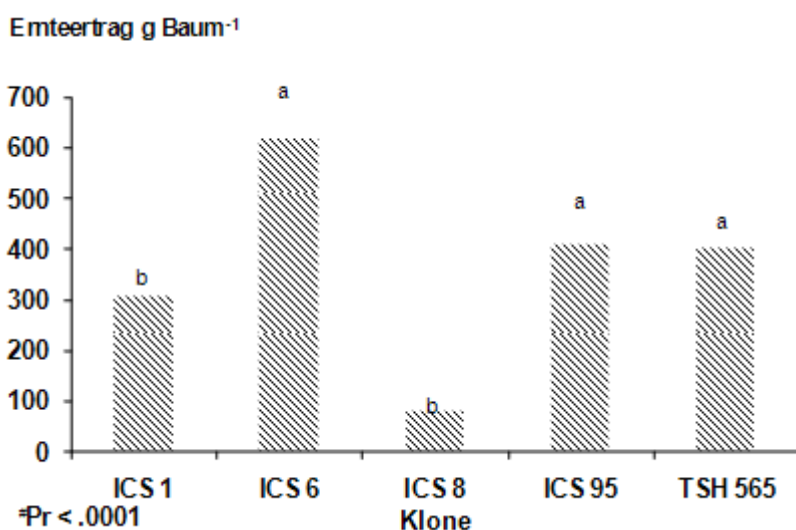


Abb. 3.29: Durchschnittliche jährliche Kakaoerträge (frische Kakaosamen) der untersuchten Klone (g/Baum) im Zeitraum 1994–97 am Standort Sapecho

(Balken mit gleichen Buchstaben sind statistisch nicht unterschiedlich bei $P < 0.01$)

Tab. 3.14: Vergleich der F Werte des Ertragsverhaltens unterschiedlicher Klone am Standort Sapecho nach dem Tukey Test (Differences of Least Squares Means)

Effect	Clone	_Clone	Adjustment	Adj P	Alpha	Lower	Upper
Clone	1	2	Tukey	0.0037	0.05	-2.4113	-0.7156
Clone	1	3	Tukey	0.0057	0.05	0.6578	2.3534
Clone	1	4	Tukey	0.0667	0.05	-1.9864	-0.2908
Clone	1	5	Tukey	0.0043	0.05	-2.3901	-0.6945
Clone	2	3	Tukey	<.0001*	0.05	2.2213	3.9169
Clone	2	4	Tukey	0.8574	0.05	-0.4230	1.2727
Clone	2	5	Tukey	1.0000	0.05	-0.8266	0.8690
Clone	3	4	Tukey	<.0001*	0.05	-3.4920	-1.7964
Clone	3	5	Tukey	<.0001*	0.05	-3.8957	-2.2001
Clone	4	5	Tukey	0.8787	0.05	-1.2515	0.4441

* Signifikanz des Behandlungseffektes bei $P < 0.01$

Es bestehen signifikante Unterschiede im Ertragsverhalten der Klone¹⁹. Der Vergleich der Ertragswerte der einzelnen Klone nach dem Tukey Test²⁰ (Tab. 3.14) verdeutlicht, dass der Klon ICS 8 und ICS 1 signifikant geringere Erträge aufweisen als die Klone ICS 6, ICS 95 und TSH 565.

Zwischen den Klone ICS 6, ICS 95 und TSH 565 bestehen keine signifikanten Ertragsunterschiede. Bezüglich des Einflusses von Schnittmaßnahmen auf die Ertragsleistung der Klone (Abb. 3.30) sind die beobachteten Unterschiede statistisch nicht signifikant.

¹⁹ Ertrag Klone $F=18.85$; $P < .0001$

²⁰ Differences of Least Squares Means

$Pr > F$ = Irrtumswahrscheinlichkeit. Gibt die Wahrscheinlichkeit (Signifikanz) eines Behandlungseffektes an

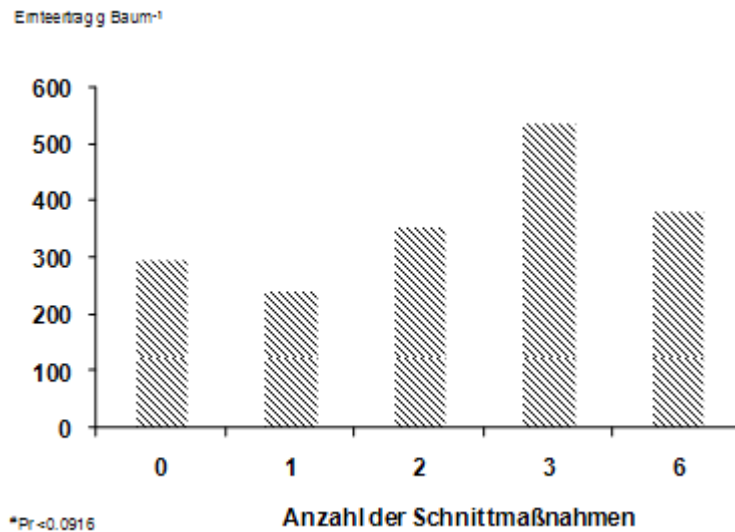


Abb. 3.30: Einfluss der Anzahl von Schnittmaßnahmen auf die durchschnittliche jährliche Ertragsleistung von Kakaoklonen während des Zeitraumes 1994–97 am Standort Sapecho

Die hier dargestellten Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zur Epidemiologie von Hexenbesen sowie des Einflusses von Schnittmaßnahmen auf Hexenbesenbefall und die Untersuchungen von Klonen werden in Kapitel 4 in einen größeren Zusammenhang gestellt und diskutiert. Dies ist insofern von Bedeutung, da die Auswirkungen von Krankheiten und Schädlingen in landwirtschaftlichen Kulturen nicht unabhängig vom sozioökonomischen Kontext einer Region oder eines Landes betrachtet werden können. Besonders die Felduntersuchungen zu Hexenbesen in Kakaopflanzungen, die im Rahmen des „International Witches’ Broom“ Projektes in mehreren Ländern Lateinamerikas durchgeführt worden sind, ergänzen die eigenen Untersuchungen und erleichtern dadurch die Entwicklung neuer Lösungsansätze zum hier dargestellten Problemkomplex.

4 Diskussion der Untersuchungsergebnisse im Kontext internationaler Hexenbesen-forschung

Systematische Felduntersuchungen zur Epidemiologie von Hexenbesen sowie zu Kontrollmaßnahmen sind vor allem in den 1980er Jahren bis zu Beginn der 1990er Jahre durchgeführt worden. Der größte Teil der Hexenbesenliteratur, die sich mit Feldversuchen befasst, stammt daher auch aus diesem Zeitraum. Umfassende vergleichende Feldforschungen zur Epidemiologie von *C. pernicios* sind von 1985 bis 1992 im Rahmen des ‚International Witches’ Broom Project‘ (IWBP) in sechs Ländern (Brasilien, Kolumbien, Ecuador, Grenada, Trinidad und Venezuela) an insgesamt neun verschiedenen Standorten durchgeführt worden, in Brasilien an den Standorten im Amazonasgebiet Altamira, Tomé Açu (beide im Bundesstaat Pará) und Ouro Preto (Bundesstaat Rondonia). In diesem Zeitraum wurden während zwei Jahren weitestgehend standardisierte Felduntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse 1993 von Stephen Rudgard, Alan Maddison und Teklu ANDEBRHAN in „DISEASE MANAGEMENT IN COCOA – Comparative Epidemiology of Witches’ Broom“ veröffentlicht worden sind (RUDGARD et al., 1993). Die daraus abgeleiteten Empfehlungen zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit sind auch heute noch wesentliche Grundlage technischer Beratungsprogramme in Lateinamerika (CEPLAC, 1997; PESTICIDE ACTION NETWORK, 2001; CATIE, 2005).

Aufgrund der Relevanz der Felduntersuchungen des International Witches’ Broom Project, werden diese im Folgenden zuerst dargestellt und hinsichtlich der Bewertung der eigenen Untersuchungsergebnisse diskutiert.

4.1 Das „International Witches’ Broom Project“ (IWBP)

Wissenschaftliche Exaktversuche in Dauerkulturen unter Feldbedingungen sind sehr schwierig durchzuführen. SCHMIDT et al. (1993) führen dazu aus, dass standardisierte Methoden zwar die vergleichende Analyse vereinfachen, die Verschiedenheit der Standorte und Unterschiede im Witterungsverlauf während des Untersuchungszeitraumes jedoch Einschränkungen darstellen, die keine verallgemeinernden Schlussfolgerungen zulassen. Zusätzlich zur großen Variabilität der Untersuchungsstandorte kommen weitere wichtige differierende Parameter wie:

- Unterschiede des Alters der Kakaobäume der verschiedenen Experimentalpflanzungen von 7 bis 30 Jahren,
- Höhe der Kakaobäume zwischen 3,1 und 7,5 m,
- Pflanzabstände zwischen 2 x 2 und 4 x 4 m,

- genetische Variabilität der verschiedenen Pflanzungen, die von Parzellen mit nur einem einzigen Klon oder Hybrid bis zu Parzellen mit mehreren unterschiedlichen Mischungen von Klonen und Hybriden reichen,
- schattenlose Pflanzungen bis Pflanzungen mit 150 Schattenbäumen ha⁻¹,
- Unterschiede in Bezug auf Lage zu Nachbarpflanzungen, Infektionsintensität mit Hexenbesen sowie andere Kakaokrankheiten,
- Unterschiedlichkeiten in der Effizienz der Beseitigung von Hexenbesentrieben aus den zu untersuchenden Pflanzungen durch technisches Personal,
- technisches Personals, das mit unterschiedlicher Sorgfalt die Bewertung und Registrierung der Beobachtungen durchführt.

Ferner konnten auch uneinheitliche Analysemethoden sowie Methoden der Datenerhebung im Rahmen dieser international über einen längeren Zeitraum operierenden Untersuchungen nicht vollkommen vermieden werden. Die Stichprobengröße von zehn untersuchten Kakao-bäumen pro Feldversuch stellte zwar statistisch eine ausreichende Arbeitsgröße dar, im Verhältnis zur gesamten Population sowie der Bandbreite der Charakteristika der Standorte wird sie aber möglicherweise als nicht ausreichend umfangreich bewertet (SCHMIDT et al., 1993).

Die oben dargestellten Einschränkungen bezüglich einer klar abgegrenzten wissenschaftlichen Bewertung und Vergleichbarkeit von Felduntersuchungen an verschiedenen Standorten gelten auch für die eigenen Untersuchungen, da die vielfältigen Interaktionen kaum erfasst und auch mit den zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Methoden nicht präzise bewertet werden können. Dennoch liefern vor allem langjährige Untersuchungen, wie sie auch im Rahmen der hier dargestellten Arbeiten durchgeführt wurden, wertvolle Erkenntnisse für ein besseres Verständnis der Kakaokultur und ihrer vielfältigen Interaktionen mit den beobachteten Parametern, die zur Entwicklung von ökologisch besser angepassten Anbaumethoden sowie zur Prävention und Kontrolle von Krankheiten und Schädlingen notwendig sind.

4.2 Epidemiologie des Hexenbesens

Ökosysteme, in denen Wildkakao (feucht tropischer Regenwald) vorkommt, sind charakterisiert durch gut verteilte Niederschlagsverhältnisse im Jahresverlauf und weitestgehend ausgeglichene Temperaturen. Der Kakaobaum nimmt den Unterbau dieser Waldökosysteme ein und weist eine große genetische Variabilität auf, was einem epidemischen Befall und einer Ausbreitung von Krankheiten wie Hexenbesen entgegen wirkt (BOWERS et al., 2001). Der Kakaoanbau erfolgt in vielen Ländern jedoch in Gebieten, die erheblich von den oben beschriebenen Bedingungen abweichen, was zu außergewöhnlichen Stresssituationen in Kakao-pflanzungen, verbunden mit dem Auftreten von Krankheiten und Schädlingen, führen kann.

Klima und Witterungsverhältnisse können in manchen Regionen bereits kleinräumig große Unterschiede und Schwankungen aufweisen. Die Standorte in Brasilien, an denen im Rahmen des IWPB Projektes Forschungen durchgeführt wurden, entsprechen aufgrund der Klimadaten und ihrer geographischen Lage (Amazonasgebiet) am ehesten dem Standort Alto Beni in Bolivien, mit einer ausgeprägten Regenzeit von Oktober bis April und einer 4 bis 6-monatigen Trockenperiode.

4.2.1 Einfluss der Witterung auf die Fruchtkörperbildung von Hexenbesen

Zum besseren Verständnis für die Entwicklung von Bekämpfungsstrategien ist es unabdingbar, Informationen über die Schwankungsbreiten der Niederschlagsverteilung zu verfügen (SCHMIDT et al., 1993).

Die Komplexität des Reproduktionszyklus von Hexenbesen erschwert die Interpretation der Untersuchungsergebnisse erheblich. Das gilt besonders in Bezug auf die Präsporulationsphase, die Beziehung von Makroklima und Mikroklima sowie die spezifischen Feuchtigkeitsverhältnisse auf krankem Pflanzengewebe. Selbst dieses muss nicht einheitlich sein, je nachdem von welchen Pflanzenteilen (vegetativen Trieben, Blüten, Früchten) es stammt, welches Alter, welche Größe es hat und welche Position im Baum es einnimmt. Abgestorbene Hexenbesenriebe, die sich z. B. im oberen Bereich einer Baumkrone befinden, sind im Vergleich zu Trieben, die auf der Bodenstreu aufliegen, trotz gleicher Witterungsbedingungen einem gänzlich unterschiedlichen Feuchteregime ausgesetzt. SCHMIDT et al.,(1993) konnten daher auch an acht der insgesamt neun Standorten keine signifikante Korrelation zwischen der Anzahl von wöchentlich gebildeten Fruchtkörpern an Hexenbesen und der Niederschlagsmenge feststellen. Lediglich am Standort Manizales in Kolumbien, der relativ gleichmäßig verteilte Jah-

resniederschläge aufweist, konnte eine leichte aber signifikante Korrelation ($R^2 = 0.35$) von Niederschlagshöhe und ausgebildeten Fruchtkörpern festgestellt werden.

Tab. 4.1: Dauer bis Sporulationsbeginn von Hexenbesen nach Beginn der Regenperiode an unterschiedlichen Standorten in Lateinamerika (modifiziert nach Rudgard et al., 1993)

Untersuchungsstandort ²¹	Anzahl Wochen nach Beginn der Regenperiode bis zu Sporulationsbeginn von Hexenbesen
Altamira – Brasilien	9
Ouro Preto – Brasilien	24
Tomé Acu – Brasilien	15
Grenada	37
Trinidad	33
Venezuela	9
Bolivien	8–12

Die Angaben in Tab. 4.1 (mit Ausnahme von Bolivien) beziehen sich auf Hexenbesen im 1. Untersuchungsjahr²². Die von ARANZAZÚ (1981b) ermittelten Werte hinsichtlich des Sporulationsbeginns von Hexenbesen in der Pazifikregion Kolumbiens entsprechen den oben dargestellten Zeiträumen.

Im Gegensatz zu den oben dargestellten Untersuchungsergebnissen konnte am Standort Sapecho mit $R^2 = 0.39$ ein signifikanter Zusammenhang von Niederschlagshöhe und Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper an Hexenbesen während des Untersuchungszeitraumes festgestellt werden. Da die Region Alto Beni eine ausgeprägte Regen- und Trockenzeit aufweist und die Induktion der Fruchtkörperbildung einen mehrmaligen Prozess der Wasseraufnahme- und Abnahme durchlaufen muss, erklärt sich auch die signifikante Korrelation ($R^2 = -0.45$) von Anzahl an Fruchtkörperbildungen an Hexenbesen und Jahreszeit (Monate). Die jahresbedingten Unterschiede von Fruchtkörperbildungen, die mit $R^2 = -0.32$ ebenfalls statistisch signifikant sind, lassen sich auf die Unterschiede der Niederschlagsverhältnisse zwischen den Jahren erklären. Die Temperatur hat keinen signifikanten Einfluss auf die Fruchtkörperbildung an Hexenbesen.

Übereinstimmung besteht darin, dass zur Induktion der Fruchtkörperbildung an Hexenbesen eine mehrwöchige Niederschlagsperiode vorausgehen muss. Tab. 4.1 stellt die Untersuchungsergebnisse dazu im Zusammenhang dar.

Die größte Anzahl von Fruchtkörpern an abgestorbenen Hexenbesenrieben wurde am Standort Sapecho während der Monate Januar bis Mai festgestellt (Abb. 3.22) und entspricht damit den Werten der Regionen Tomé Açu und Altamira in Brasilien. Dieser Zeitraum ist

²¹ Am Standort Manizales in Kolumbien kommt es zu keiner ausgeprägten Trockenperiode.

²² Die Angaben zu Bolivien beziehen sich auf Durchschnittswerte von Hexenbesen aller Altersklassen während des Untersuchungszeitraumes 1991 bis 1996 am Standort Sapecho).

nach ANDEBRHAN et al. (1993) klimatisch geprägt vom Übergang der Regenzeit zum Südwinter, der durch geringer werdende Monatsniederschläge und geringfügig niedrigere Temperaturen charakterisiert ist .

4.2.2 Phänologie des Kakaobaumes und Hexenbeseninfektionen

Im Rahmen des IWB-Projektes wurde der Zusammenhang von Fruchtkörperbildungen des Hexenbesenpilzes und Hexenbeseninfektionen an Kakaobäumen untersucht. Die Berechnungen der Untersuchungsergebnisse erfolgten durch Regressionsanalyse, indem unter Berücksichtigung der Inkubationszeit die Symptomausprägungen an Kakaobäumen 6 bzw. 8 Wochen nach Fruchtkörperbildungen untersucht wurden. Nur in einem Fall (Standort Altamira) konnte eine signifikante Regression für Symptome an vegetativen Trieben ($R^2 = 0.46$) und Blütenpolstern ($R^2 = 0.34$) gefunden werden. An einigen Standorten koinzidierten starke Symptomausbildungen an Trieben mit einem Triebwachstumsschub, während im Folgejahr dies bereits nicht mehr der Fall war (SCHMIDT et al., 1993). Ein kausaler Zusammenhang zwischen der Intensität der Ausbildung von Fruchtkörpern an Hexenbesen, Perioden eines Flushing und der darauf folgenden Anzahl infizierter Kakaotriebe konnte generell nicht festgestellt werden. AITKEN (1997) bestätigt diese Beobachtungen durch Untersuchungen aus dem Bundesstaat Bahía/Brasilien. Dort wurde 1996 eine außergewöhnlich lange Trockenperiode registriert, die erst durch Regenfälle im November 1996 beendet wurde. Diese Regenfälle förderten ein intensives Flushing mit darauf folgendem starkem Hexenbesenbefall an Trieben und Früchten, obwohl keine signifikante Erhöhung der Fruchtkörperbildung in den vorhergehenden Monaten beobachtet werden konnte. AITKEN (1997) schließt daraus, dass solange in einer Region ein großer Infektionsdruck aufgrund von „Hintergrund“ Inokulum vorhanden ist, es keiner großen Mengen an Basidiensporen bedarf, um eine hohe Anzahl an Infektionen hervorzurufen.

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen konnte kein Zusammenhang zwischen der Intensität von Fruchtkörperbildungen an Hexenbesen und Anzahl ausgebildeter Hexenbesentriebe an Kakaotrieben innerhalb eines Zeitraumes zwischen 1 bis 12 Monaten nach Fruchtkörperbildungen festgestellt werden²³. Dies verdeutlicht, dass in Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnisse von SCHMIDT et al. (1993) und den Beobachtungen von AITKEN (1997), die Quantität an *Crinipellis* Inokulum keine entscheidende Rolle für die Intensität von Hexenbeseninfektionen an Kakaobäumen darstellt.

²³ Es wurde an Hand der Regressionsanalyse das Auftreten von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben nach 1, 2 bis 12 Monate nach Fruchtkörperbildungen an abgestorbenen Hexenbesen untersucht.

Die Monate mit der höchsten Fruchtkörperbildung an Hexenbesen, zwischen Januar und Juni, koinzidieren im Untersuchungsgebiet mit Phasen unterschiedlicher Intensität von Triebwachstumsschüben (Flushing). Da nur aktives, sich im Wachstum befindendes Kakaogewebe anfällig gegenüber Hexenbeseninfektionen ist, wäre zu erwarten, dass während dieses Zeitraumes auch eine entsprechend erhöhte Anzahl von Hexenbeseninfektionen an Kakaotrieben zu beobachten ist. Wie in Kapitel 3.3.3 dargestellt, treten jedoch am Standort Sapecho die meisten Hexenbeseninfektionen im Monat Juli auf. Zu dieser Jahreszeit kommt es, wenn überhaupt, aber nur zu einem sehr geringfügigen Triebwachstum. Dennoch konnte an Hand der multiplen Regressionsanalyse eine leichte, wenn auch signifikante Beziehung von Triebwachstum und dem Auftreten von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass vom Zeitpunkt der Infektion eines Kakaotriebes bis zur Symptomausbildung mehrere Monate vergehen können, da Infektionen während eines langen Zeitraumes latent vorhanden sein können, ohne dass es zur Ausbildung von Krankheitssymptomen kommt. Die Tatsache, dass im Rahmen der IWPB Untersuchungen kein Zusammenhang zwischen Flushing und Hexenbesensymptomen nachgewiesen werden konnte, steht möglicherweise in Zusammenhang mit den nur 2-jährigen Felduntersuchungen.

Der Vergleich des Reproduktionszyklus von Hexenbesen der Untersuchungsstandorte Sapecho und Tupiza verdeutlicht die extremen Unterschiede, die selbst innerhalb einer eng begrenzten Region auftreten können. Dies betrifft sowohl die Intensität der Fruchtkörperbildung (Abb. 3.24) als auch die Anzahl infizierter Triebe an Kakaobäumen. In beiden Fällen sind diese am Standort Tupiza sehr viel weniger ausgeprägt und statistisch signifikant unterschiedlich zum Standort Sapecho (Abb. 3.23).

Die Untersuchungen bestätigen die Beobachtungen von Beratern und Landwirten in der Region, die feststellen, dass an höher gelegenen Produktionsstandorten ein geringerer Befall von Hexenbesen vorkommt. Möglicherweise spielen hier mikroklimatische Aspekte, wie z. B. eine stärkere Luftzirkulation und damit verbunden eine Verringerung des Zeitraumes, während dessen die Pflanzenoberflächen befeuchtet sind, eine entscheidende Rolle oder auch Temperaturunterschiede.

Der Entwicklungszyklus des Hexenbesenpilzes weist eine statistisch signifikante Fluktuationen von Jahr zu Jahr auf. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse hat für das Jahr 1995 am Standort Sapecho eine außergewöhnlich starke Zunahme an Hexenbeseninfektionen sowohl an den untersuchten Klonen als auch an Hybridbäumen gezeigt. Am Standort Tupiza kam es trotz sich annähernder Niederschlagsregime (Sapecho 1559 mm; Tupiza 1500 mm) zu keiner Erhöhung an Hexenbeseninfektionen (Abb. 3.23).

Während der sehr feuchten Witterungsverhältnisse, wie sie während der Jahre 1990 bis 1994 vorgeherrscht haben, mit überdurchschnittlich hohen Jahresniederschlägen, traten nicht so viele Hexenbeseninfektionen auf, wie zu erwarten gewesen wäre. Im Laufe des Jahres 1994 hingegen kam es in Sapecho zu der höchsten durchschnittlichen Fruchtkörperausbildung pro Hexenbesen während des gesamten Untersuchungszeitraumes überhaupt. Die in Zusammenhang damit zu erwartende stark erhöhte Sporenbildung von Hexenbesen hat dennoch nicht zu einer signifikanten Erhöhung des Hexenbesenbefalls an Kakaobäumen im gleichen Zeitraum geführt. Bemerkenswert ist auch die bedeutend geringere Anzahl an ausgebildeten Fruchtkörpern pro Hexenbesen am Standort Tupiza im Vergleich zu Sapecho (Abb. 3.24). Wie in Abb. 3.23 dargestellt, ist am Standort Tupiza die Anzahl von infizierten Hexenbesentrieben zu 94% auf jahresbedingte Einflüsse zurückzuführen, während dies am Standort Sapecho nicht der Fall ist. Die extrem hohen Befallswerte mit Hexenbesentrieben am Standort Sapecho im Jahr 1995, die sowohl an den untersuchten Hybridbäumen als auch bei den Klonen auftraten, lassen sich nicht durch die statistisch ausgewerteten Parameter erklären.

Um weitere Einflussgrößen und damit die Zusammenhänge besser verstehen zu können, wäre es von Bedeutung, den Zeitpunkt einer Infektion genauer bestimmen zu können, da dieser nicht mit der Symptomausprägung koinzidieren muss. Unter Feldbedingungen an ausgewachsenen Kakaobäumen ist dies jedoch äußerst schwierig, da die Symptomausprägung stark abhängig ist von der Art und dem Alter des befallenen Gewebes, den Witterungsverhältnissen und dem Entwicklungszyklus des Kakaobaumes. So können infizierte Terminalknospen oder Knospen der Blattachsen unter Umständen erst nach einigen Wochen, in manchen Fällen erst nach Monaten Symptome ausbilden.

Eine besondere Art von Wechselbeziehung von Hexenbeseninfektionen an Kakaopflanzen und Schattenbäumen konnte in der eigenen Pflanzung beobachtet werden. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, wies die Kakaopflanzung in Sapecho einen alten Schattenbaumbestand überwiegend der Gattung *Inga ssp.* auf. Zur Umgestaltung dieser Kakaopflanzung in ein Agroforstsystem war es erforderlich, den Bestand an alten Schattenbäumen zu eliminieren, um den neu eingesäten und gepflanzten Bäumen Entwicklungsmöglichkeiten zu gewähren. Zur Vermeidung von Schäden an den jungen Kakaoklonen wurde der komplette Bestand an *Inga* geringelt, indem die Rinde einschließlich des Kambiums am Fuß des Baumes auf einer Breite von 40 cm entfernt wurde. Die Unterbrechung des Phloemsaftstroms hatte ein allmähliches Absterben der Bäume im Laufe des Jahres 1995 zur Folge. Die damit verbundene Entlaubung der Baumkronen führte zu einer langsamen Erhöhung der Einstrahlung und löste keinen außergewöhnlichen Triebwachstumsschub aus, wie dies nach drastischen Interventionen durch Baumschnittarbeiten ansonsten zu beobachten ist. Es stellt sich die Frage, ob der Prozess des

Absterbens eines dominanten Dosels innerhalb einer Kakaopflanzung im Zusammenhang mit dem extremen Befall von Kakaotrieben mit Hexenbesen im Jahr 1995 stehen könnte. Vergleichbare Phänomene lassen sich immer wieder an einzelnen Kakaobäumen beobachten, die sich im Einflussbereich von alten, absterbenden Schattenbäumen befinden. GÖTSCH (in: SCHULZ et al., 1994) weist in diesem Zusammenhang auf allelopathische²⁴ Effekte, ausgehend von absterbenden Pflanzen, hin, die die Wuchsdynamik, von in der Nachbarschaft stehenden Pflanzen, negativ beeinflussen können.

KRAUSS, U. & SOBERANIS, W. (2001) haben im Rahmen von Feldversuchen in Peru signifikant höheren Hexenbesenbefall in unbeschatteten Kakaopflanzungen nachgewiesen. Der erhöhte Lichteinfall durch das Absterben der Schattenbäume im Jahr 1995 am Standort Sapecho ist daher ebenfalls als mögliche Ursache für die extrem hohe Zunahme an Hexenbesentrieben in diesem Zeitraum in Betracht zu ziehen.

Die bodenbürtige Pilzkrankheit in Kakao- und Kaffepflanzungen *Rosselinia* tritt häufig in Zusammenhang mit *Inga ssp.* Baumbeschattung auf, welche meist zuerst von *Rosselinia ssp.* befallen werden und dann nach und nach die umliegenden Kakao- und Kaffepflanzen befallen. Nach eigenen Beobachtungen in Kolumbien und Bolivien treten Probleme mit *Rosselinia* vor allem in denjenigen Pflanzungen auf, die einen überalternden Inga Baumstand aufweisen. Forschungen zu phyto-sanitären Problemen in Dauerkulturen haben nach meinen Kenntnissen den Zusammenhang von alternder Begleitvegetation und Krankheitsanfälligkeit bisher noch kaum Beachtung geschenkt. Schwerpunkt der Forschungsarbeiten sind Pflanzenschutzmaßnahmen, Resistenzzüchtung und kulturelle Maßnahmen zur Krankheitskontrolle (PLOETZ, R.C., 2007; GARCÍA CÓRDOBA, J. ET.AL, 2005; SURUJDEO-MAHARAY, S. & UMAHRAN, P., 2004; KRAUSS, U. & SOBERANIS, W., 2001; SCHMIDT ET.AL, 1993).

Die Ergebnisse der Untersuchungen, insbesondere hinsichtlich der oben diskutierten Problematik lassen vermuten, dass neben den quantitativ messbaren Parametern noch andere, bedeutende Einflussgrößen vorhanden sein müssen, die entscheidenden Einfluss auf die Epidemiologie von Hexenbesen haben. Gerade in Bezug auf die Kakaokultur in Agroforstsystemen besteht in diesem Zusammenhang noch erheblicher Forschungsbedarf (PLOETZ, R.C., 2007; Rao, M.R. et.al., 1998). Untersuchungen von BOS, M. et.al. (2007) in Indonesien, die Kakao unter natürlicher Beschattung (ausgelichteter Primärwald) und in Kulturpflanzungen mit nur wenigen Schattenbaumarten untersuchten, zeigten, dass Ernteverluste bedingt durch Krank-

²⁴ Allelopathie: gegenseitige Beeinflussung von Pflanzen auf chemischem Wege, entweder durch schädigende Ausscheidungen oder durch Substanzen, die beim Abbau pflanzlicher Rückstände entstehen. Häufig sind Mikroorganismen beteiligt, indem sie schädliche Stoffe freisetzen, aber auch abbauen können (BORRIS und LIBBERT, 1985).

heiten und Insektenbefall mit der Homogenität der Anbausysteme zunehmen. Ausgehend von ihren Forschungsergebnissen formulierten sie als Hypothese, dass hoch diversifizierte Agroforstsysteme unter Einbeziehung nativer Baumarten die Ernteerträge verbessern können, hingegen mit der Homogenität der Anbausysteme die Gefahr von Ernteverlusten durch Krankheiten und Schädlingen zunehmen.

4.3 Vergleich der Klone auf Hexenbesenbefall und Ertragsentwicklung

Große Anstrengungen bei der Suche nach Kontrollmöglichkeiten nicht nur gegenüber der Hexenbesenkrankheit in Kakaopflanzungen liegen zunehmend in der Suche nach toleranten oder resistenten Genotypen (SURUJDEO-MAHARAY, S. & UMAHRAN, P., 2004; BROWN et.al. 2005).

4.3.1 Anfälligkeit gegenüber Hexenbeseninfektionen

Die Auswahl von gutem Pflanzmaterial ist von großer Bedeutung für den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg einer Dauerkultur wie Kakao. Ziel der Pflanzenzüchtung war bisher die Auswahl und Reproduktion von möglichst ertragreichem und krankheitsresistentem Material, um den immer wiederkehrenden phytosanitären Problemen im Erwerbsanbau entgegenzutreten zu können. Es stehen heute schätzungsweise 2500 bis 3000 verschiedene selektierte genetische Gruppen von Kakao für den Anbau zur Verfügung sowie 300 bis 500 Gruppen von Wildkakao (BOWERS et al., 2001)²⁵. In vielen Kakaoanbaugebieten wurde aufgrund der Hexenbesenkrankheit von der generativen Vermehrung in Form von Hybridsaatgut auf die vegetative Vermehrung durch Veredelung übergegangen (TRUJILLO, G., 2007; CATIE, 2005; 2002; SOMARRIBA, E. et.al. 2005; MIRANDA, M. & SOMARRIBA, E. 2005). In der Region des Alto Beni wurde bereits Ende der 1980er Jahre mit den ersten Programmen zur Umstellung von Kakaopflanzungen mit ausgewählten Klonen begonnen (SOMARRIBA, E. & TRUJILLO, L., 2005). Von 2002 bis 2005 wurde ein großes Kakaoentwicklungsprogramm mit dem Namen „*Modernización de la cacaocultura en el Alto Beni*“ (Modernisierung der Kakaokultur im Alto Beni) durchgeführt. Es wurde vom internationalen Forschungszentrum CATIE – Costa Rica geleitet und hatte zum Ziel, in der Anbauregion Alto Beni alte Hybridsaatpflanzungen durch Kakaoklone zu erneuern bzw. die Kakaoanbaufläche insgesamt durch produktive Klone zu erweitern (CATIE, 2002; SOMARRIBA, E. et.al. 2005; BENTES-GAMA, M. et.al. 2005; LAURA QUENTANA, et.al. 2005). Die im Rahmen der eigenen Untersuchungen beobachteten Klone sind Bestandteil des in der Region Alto Beni empfohlenen Kakaomaterials.

Die in der Anbauregion empfohlenen und im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klone, zeigen in Bezug auf Hexenbesentoleranz, wie in Kapitel 3.3.4 dargestellt, statistisch signifikante Unterschiede. Die Klone ICS 6 und ICS 8 sind den Klonen ICS 95, TSH 565 und ICS 1

²⁵ Bedeutende Genbanken von Kakaoklonen befinden sich in Trinidad-Tobago, Costa Rica (CATIE) und Ecuador (INIAP)

in Bezug auf Hexenbesentoleranz signifikant überlegen. Die Sortenwahl in Bezug auf Krankheitstoleranz und Ertrag bei der Anlage von Neupflanzungen ist von großer Bedeutung, löst für sich allein das Problem jedoch nicht. Der Klon ICS 8 weist z. B. eine hohe Toleranz gegenüber Hexenbesen auf (Abb. 3.25), bringt jedoch mit Abstand die geringsten Erträge (Abb. 3.28).

Die Komplexität der Hexenbesenkrankheit macht deutlich, dass nur unter Berücksichtigung aller Faktoren und dem Verständnis der vielschichtigen Interaktionen Lösungen gefunden werden können. Wie bereits oben dargestellt, sind Probleme in der Kakaoproduktion, wie die der Hexenbesenkrankheit, nicht kausal einigen wenigen Betriebs- oder Standortfaktoren zuzuordnen.

4.3.2 Vergleich der Klone auf ihr Ertragsverhalten

Auch hier zeigt sich, dass die Untersuchungsergebnisse zur Ertragsleistung der Klone differenziert zu betrachten sind und nicht ohne weiteres für verallgemeinernde Schlussfolgerungen herangezogen werden können.

- Die Untersuchungen bezüglich der Ertragsleistungen haben gezeigt, dass signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Klonen bestehen. Die Klone ICS 1 und ICS 8 sind in ihrem Ertragsverhalten den Klonen ICS 6, ICS 95 und TSH 565 signifikant unterlegen. Die Klone ICS 6, ICS 95 und TSH 565 weisen keine signifikanten Unterschiede in ihrem Ertragsverhalten auf.
- Aus der Anbaupraxis im Alto Beni ist bekannt, dass die in Versuchstationen „gepflegten“ und erprobten Klone in den verschiedenen Anbaugebieten der Region oftmals gänzlich unterschiedliche Ertragsergebnisse erzielen (Trujillo, G. 2007). Dies hängt zum einen von den vielen Variablen wie Boden, Hangneigung, Niederschlag, mikroklimatischen Verhältnissen, Anbausystemen und Pflegemaßnahmen ab. Zum anderen lässt sich jedoch auch beobachten, dass selbst innerhalb ein und derselben Pflanzung Bäume des gleichen Klons unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Ertrag und Anfälligkeit auf Hexenbesen aufweisen können.
- Der Anbau von Hohertragsklonen mit den von CATIE empfohlenen Standdichten von 3 m x 3 m erfordern intensive Pflegearbeiten in Form von regelmäßigen Erhaltungsschnitten. Ein Ausbleiben dieser Pflegemaßnahmen führt zur Bildung eines dichten Kakaokronendaches mit extremer Selbstbeschattung, welches wiederum dem Hexenbesen sowie anderen Krankheiten und Schädlingen zuträglich ist und zu entsprechend hohen Ernteverlusten führen kann.

- Wird dafür Sorge getragen, dass regelmäßige Pflege- und Kontrollmaßnahmen effizient durchgeführt werden, ist ein ertragreicher aber für Hexenbesen anfälligerer Klon wie TSH 565 oder ICS 95 einem Hexenbesen toleranteren aber wenig produktivem Klon wie ICS 8 vorzuziehen.

Einige Kakaoproduzenten sind dazu übergegangen, auf ihren eigenen Betrieben ertragreiche und resistente Kakaobäume zu selektieren, diese vegetativ zu vermehren und auf diese Art und Weise ihre Pflanzungen zu erneuern bzw. zu erweitern. Diese Vorgehensweise hat bisher schon zu vielversprechenden Ergebnissen geführt und findet bei immer mehr Produzenten Nachahmung²⁶. Auch Techniken zur manuellen Bestäubung zur Ertragserhöhung werden von Kleinproduzenten erfolgreich durchgeführt.

Die Zentralgenossenschaft EL CEIBO (TRUJILLO, G., 2007) hat im Laufe der letzten 15 Jahre ertragreiche und krankheitstolerante Kakaobäume in der Region Alto Beni selektiert und auf der eigenen Experimentalstation vegetativ vermehrt und getestet. Es hat sich dabei herausgestellt, dass die lokalen Selektionen häufig den eingeführten Klonen sowohl im Ertragsverhalten als auch bezüglich Toleranz gegenüber Hexenbesen überlegen sind.

Gerade in Bezug auf Hexenbesentoleranz ist zu berücksichtigen, dass nach Untersuchungen von PERES GRAMACHO et.al. (2005) in Bahia, Brasilien unterschiedliche Ökotypen von *Crinipellis pernicioso* nachgewiesen werden konnten. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden von drei Kakaoanbaugebieten (Urucuca, Camacan und Una), die sich sowohl von den klimatischen Bedingungen, den Bodeneigenschaften und Landnutzungsformen unterscheiden, und die in mindestens 55 km Entfernung voneinander liegen Isolate von *C. pernicioso* analysiert und statistisch ausgewertet. Diese Untersuchungen sind vor allem hinsichtlich der Suche nach tolerantem oder resistenten Pflanzenmaterial von Bedeutung, da auf Grund der Variabilität des *Crinipellis* Genoms in Bezug auf Resistenzselektion- und Züchtung große Herausforderungen gestellt sind.

²⁶ Kommentare von Produzenten der Area III, die dies praktizieren, während Feldbesuchen im Alto Beni.

4.4 Wirksamkeit von Kontroll- und Pflegemaßnahmen

Phytosanitäre Pflegemaßnahmen sind bis heute die wichtigsten und kostenaufwendigsten Maßnahmen zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit (RUDGARD & ANDEBRHAN, 1987; AITKEN, 1997). Da die Verbreitung der Basidiosporen vor allem über die Luft erfolgt, sind für die Planung von Kontrollmaßnahmen genauere Informationen über Reichweite und Intensität des Inokulum sowie Kenntnisse über Befalls- oder Infektionsgradienten²⁷ von Bedeutung. Bisher liegen nur wenige Veröffentlichungen über den Zusammenhang von Hexenbeseninfektionen an Kakaopflanzen in Bezug zur Entfernung einer Infektionsquelle vor. BAKER et al. (1941) beobachteten die höchsten Befallswerte von Hexenbesen in einer jungen Kakaopflanzung, die sich in 100 m Abstand zu einer stark mit Hexenbesen infizierten befand. EVANS & SOLORZANO (1982) berichteten von Infektionen bis zu einem Abstand von 800 m Entfernung zur Infektionsquelle, während ARAGUNDI et al. (1987) in ihren Untersuchungen Sporenflug bis zu einer Entfernung von 285 m nachweisen konnten (Kapitel 2.2.3). ALVES et al. (2006), die in Bahia, Brasilien Felduntersuchungen zur Kontrolle von Hexenbesen durchführten, konnten keine signifikante Reduzierung von Hexenbeseninfektionen durch phytosanitäre Kontrollmaßnahmen feststellen.

Es konnte keine übereinstimmenden Bewertungen bezüglich des Risikos eines Befalls mit Hexenbesen bzw. der zu erwartenden Ernteverluste aufgrund des Abstandes einer Pflanzung zu einer möglichen Infektionsquelle an Hand der recherchierten Literaturquellen festgestellt werden.

Wegen der Relevanz in Beziehung zu den eigenen Untersuchungsergebnissen werden im Folgenden Feldversuche beschrieben, die im Rahmen des IWP-Projektes durchgeführt wurden. Vor dem Hintergrund dieser Untersuchungen werden anschließend die eigenen Ergebnisse zu den durchgeführten Baumschnittmaßnahmen diskutiert.

²⁷ Der Infektionsgradient gibt an, inwieweit die Wahrscheinlichkeit eines Krankheitsbefalls mit Entfernung zur Infektionsquelle abnimmt.

4.4.1 Feldversuch I: Befallsgradienten von Hexenbeseninfektionen an Kakaosetzlingen in Relation des Abstandes zur Infektionsquelle (ANDEBRHAN et al., 1993)

Diese Feldversuche wurde an zwei unterschiedlichen Standorten durchgeführt.

Brasilien

Die Untersuchungen in Brasilien wurden in der Experimentalstation des CEPLAC am Rio Negro, 65 km von Manaus entfernt, in einem dichten Primärwald vorgenommen. Als Wirtspflanzen für den Feldversuch dienten Kakaokeimlinge des für Hexenbesen sehr anfälligen Typs Catongo, deren Triebspitzen man oberhalb der Kotelydone 6 bis 7 Wochen nach der Keimung entfernte, um das Wachstum von zwei aktiven Knospen zu stimulieren.

Nach Rodung einer Schneise inmitten des Primärwaldes von 8 x 400 m Fläche sind die jungen Kakaopflanzen dort in Holzgestelle in Abstand von 1, 10, 20, 40, 80, 160 und 320 m zu einer Inokulumquelle gestellt worden. Die als Inokulum dienenden sporulationsfähigen Hexenbesentriebe wurden an Nylonschnüren in unterschiedlicher Höhe aufgehängt und auch direkt auf die Bodenoberfläche gelegt.

Die Setzlinge stellte man in den oben angegebenen Abständen zur Infektionsquelle in Holzgestelle auf der Bodenoberfläche, in 1m, 2m, sowie 3m Höhe auf. Die Auswertung auf Hexenbesenbefall erfolgte 2 bis 3 Wochen nach Beendigung der Exposition im Schattenhaus durch Auszählung der Befallssymptome.

Zu Beginn testete man alle vier Positionen simultan, im Anschluss daran erfolgte dies individuell, indem jede Position zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit Hexenbesen bestückt wurde. Es sind jeweils 1000 Hexenbesen für jeden Level verwendet worden, insgesamt also 4000 pro Versuchsdurchlauf. Sowohl die Anzahl der Tage, an denen die abgestorbenen Hexenbesentriebe Fruchtkörper ausbildeten, als auch die jeweilige Anzahl der Fruchtkörper wurden registriert.

Ekuador

Bei der Versuchsanlage in Ekuador (Kakaopflanzung Palma Chávez der Experimentalstation Pichilingue) verwendete man als Infektionsquelle keine „künstlich“ aufgehängten Hexenbesen als Inokulum sondern eine mit Hexenbesen infizierte Kakaopflanzung. In einer Kakaoparcelle „B“ sind sorgfältig alle mit Hexenbesen infizierten Pflanzenteile an den Bäumen beseitigt worden. Als Infektionsquelle diente eine angrenzende mit Hexenbesen befallene Pflanzung „A“. Frei bestäubte Kakaosetzlinge der Klone EET-19, EET-16 und ICS-95 wurden

während 2, 3 und 6 Wochen Dauer in 3 Gruppen zu je 15 Pflanzen in Abständen von 2, 4, 8, 16, 32 und 64 m zur Infektionsquelle A in die von Hexenbesen bereinigte Parzelle „B“ auf die Bodenoberfläche gestellt. Die Auswertung der Befallssymptome erfolgte anschließend unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus.

Ergebnisse der Feldversuche Brasilien

- Insgesamt wurden etwa 2/3 weniger Krankheitssymptome, ausgehend von auf der Bodenoberfläche aufliegenden Hexenbesen, registriert als von denen in 1, 2 oder 3 m Höhe positionierten (Abb. 4.1).
- Unter natürlichen Bedingungen kann dieser Wert noch erheblich darunter liegen, da durch Laubstreu oder Beikrautbewuchs zum einen die Fruchtkörperausbildung an Hexenbesen und zum anderen die Möglichkeit der Sporen, durch Luftbewegungen transportiert zu werden, sich zusätzlich verringert.
- Es ist davon auszugehen, dass die größte Infektionsgefahr von Hexenbesen ausgeht, die sich in der Baumkrone von Kakaobäumen befinden.
- Trotzdem konnten auch von auf dem Boden liegenden Hexenbesen in 320 m Entfernung vom Inokulum noch Infektionen hervorgerufen werden.
- Aufgrund der unterschiedlich hohen Sporulationsintensität der als Infektionsquelle dienenden Hexenbesen während der Versuchsphase können aber keine „strengen“ Schlussfolgerungen in Bezug auf die Effekte der einzelnen Versuchsglieder getroffen werden. Dennoch ist als klarer Trend festzustellen, dass generell mit zunehmender Entfernung der Wirtspflanze zur Infektionsquelle eine Verringerung an Infektionen zu erkennen ist (ANDEBRHAN et al., 1993).

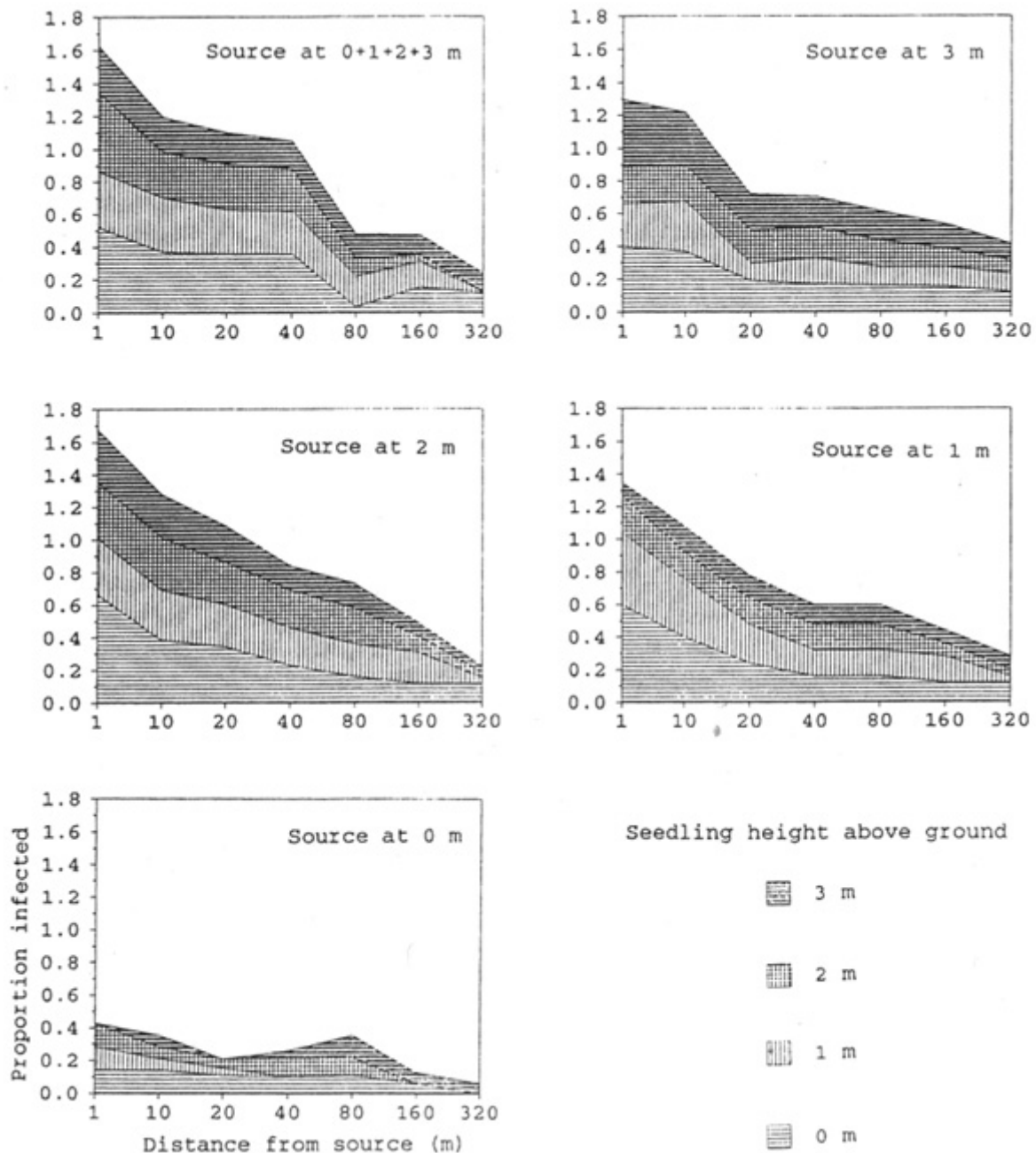


Abb. 4.1: Die Diagramme zeigen das Verhältnis der Steigung des Kurvenverlaufs von mit Hexenbesen infizierten Kakaokeimlingen in verschiedenen Höhenpositionen und Entfernungen zu in unterschiedlicher Höhe positionierten Infektionsquellen an. Zur Berechnung des Gesamtverhältnisses der Infektionen muss der Wert der Kurvensumme auf der y-Achse durch 4 dividiert werden. Rio Negro, Manaus, Brazil (ANDEBRHAN et al., 1993:160)

Ergebnisse der Feldversuche Ekuador

- Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse des Feldversuchs in Ekuador zeigt, dass mit größer werdender Verweildauer der Kakaopflanzen im Feld die Infektionsrate zwar ansteigt, mit zunehmender Entfernung zu der unbehandelten Pflanzung (Infektionsquelle) die Befallswerte jedoch stark zurückgehen und nur noch bei einer Größenordnung von 5–10 % liegen (Abb. 4.2).

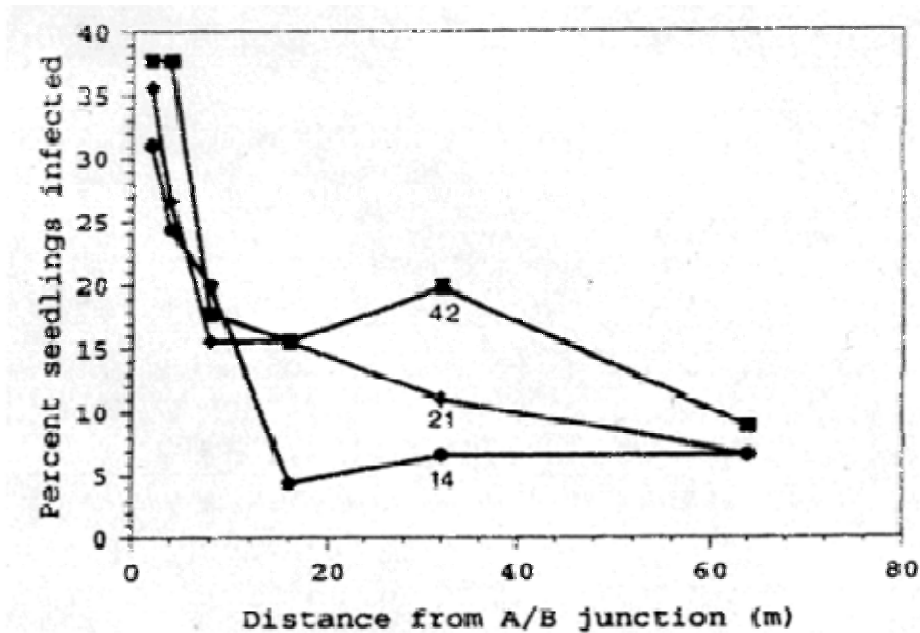


Abb. 4.2: Befallsgradienten von Hexenbeseninfektionen (Prozent) an Kakaosetzlingen in Bodenhöhe, in Abhängigkeit ihrer Verweildauer (14, 21 und 42 Tage) innerhalb einer von Hexenbesen gesäuberten Kakaopflanzung und in unterschiedlicher Entfernung zu einer stark mit Hexenbesen infizierten Kakaopflanzung in „Palma Chávez“, Ekuador (ANDEBRHAN et al., 1993:163)

- Dies bedeutet, dass die phytosanitären Baumschnittmaßnahmen zu Versuchsbeginn effizient waren, trotz des (mit großer Wahrscheinlichkeit) Verbleibens einiger übersehener Hexenbesen in der behandelten Versuchsanlage B und einer übergeordneten Präsenz von Hexenbeseninokulum in der Atmosphäre.
- Aufgrund der Untersuchungsergebnisse ziehen die Autoren den Schluss, dass aus dem Blickwinkel des Krankheitsmanagements phytosanitäre Schnittmaßnahmen eine unabdingbare Notwendigkeit sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass vor allem Hexenbesen im Bereich der Baumkrone die bedeutendste Infektionsquelle darstellen und ihre Beseitigung und das Belassen auf der Bodenoberfläche zu einer bedeutenden Reduzierung des Inokulum führt (ANDEBRHAN et al., 1993).

4.4.2 Feldversuch II: Untersuchungen zur Wirksamkeit phytosanitärer Kontrollmaßnahmen in Form von Baumschnitt (MADDISON et al., 1993)

Die Feldversuche wurden in Brasilien, Kolumbien, Ekuador und Venezuela in Vollertrag stehenden Kakaopflanzungen durchgeführt. Es sollte die Effizienz phytosanitärer Baumschnittmaßnahmen zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit an Kakaobäumen untersucht und der Befallsgradient unter Feldbedingungen experimentell bestimmt werden.

Zum Untersuchungsaufbau: Ein rechteckiger Block aus Reihen mit je 20 x 45 Bäumen wurde in eine Parzelle A und eine Parzelle B unterteilt. Für Parzelle A wurden je 10 Reihen mit unbeschnittenen und hexenbesenbefallenen Kakaobäumen belassen. In Parzelle B mit insgesamt 35 Reihen wurden alle Kakaobäume sorgfältig von Hexenbeseninfektionen gereinigt. Versuchsbedingung war, dass sich an den drei angrenzenden Seiten dieser von Hexenbesen bereinigten Parzelle B keine hexenbeseninfizierten Kakaobäume befinden durften.

Es wurden die Anzahl an Infektionen mit Hexenbesen in Parzelle B in Bezug zum Abstand zur Infektionsquelle A untersucht sowie die Bildung von Fruchtkörpern in Parzelle A. Die Untersuchungen fanden an zehn randomisierten Bäumen statt.

Ergebnisse:

- Die Unterschiede zwischen den Standorten in Bezug auf den Befall mit Hexenbesen in den Parzellen B waren bedeutend.
- Insgesamt konnte eine auffallende Abnahme der Anzahl an Hexenbeseninfektionen in Parzelle B im Vergleich zur nicht behandelten Parzelle A beobachtet werden.
- Nicht immer kam es zu einer deutlichen Abnahme von Hexenbeseninfektionen innerhalb der Parzelle B mit Vergrößerung der Entfernung zur Infektionsquelle (Parzelle A).
- Ab einer gewissen Entfernung zur Infektionsquelle (Parzelle A) war mit noch weiterer Vergrößerung des Abstandes keine Verringerung von Hexenbeseninfektionen mehr festzustellen. Die Ursache hierfür wird im Vorhandensein von „Hintergrundinokulum“ aus weiter entfernt gelegenen Infektionsquellen in der Region gesehen.
- Neben einem positiven Effekt in Bezug auf die Reduzierung von Infektionen in den behandelten Parzellen konnte an den meisten Standorten auch eine Steigerung der Erträge in Vergleich zu Parzelle A verzeichnet werden.

Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass die oben beschriebenen IWPB-Untersuchungen zwar nur während des Zeitraumes eines Jahres und an relativ wenigen Standorten durchgeführt wurden, diese aber dennoch einen großen Beitrag zur Verbesserung des Kenntnisstandes über Infektionsgradienten von Hexenbesen leisten konnten. Die große Varianzbreite der Ergebnisse ist in Anbetracht der Verschiedenheit der Standorte und den vielen, nicht beeinflussbaren Parametern (Witterungsverhältnisse, Krankheitsdruck, Entfernung zu infizierten Kakaopflanzungen, Lage der Versuchsanlagen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit u.a.m.) nicht verwunderlich. Dennoch wird die Prognose für die Wirksamkeit von phytosanitären Maßnahmen in den meisten Fällen als positiv bewertet. Eine Aussage bezüglich eines allgemeingültigen Infektionsgradienten, z. B. zur Einschätzung eines Infektionsrisi-

kos in Abhängigkeit des Abstandes zu einer Infektionsquelle, kann dennoch nicht getroffen werden (MADDISON et al., 1993).

Die Implikationen der oben beschriebenen Ergebnisse für das Krankheitsmanagement werden von den Autoren wie folgt zusammengefasst:

- a) Sorgfältig durchgeführte phytosanitäre Baumschnittmaßnahmen reduzieren den Krankheitsbefall und erhöhen die Kakaoerträge in vielen Fällen, selbst wenn sich infizierte Kakaopflanzungen in direkter Nachbarschaft befinden.
- b) Der Nachweis von Infektionsgradienten zeigt, dass infizierte Kakaopflanzungen in direkter Nachbarschaft eine Bedeutung als Infektionsquelle haben und die Wirksamkeit phytosanitärer Maßnahmen beeinträchtigen können.
- c) Die Wirkung von „Nachbareffekten“ infizierter Pflanzungen in Bezug auf ein quantifizierbares Infektionsrisiko ist aufgrund der vielfältigen unterschiedlichen standortspezifischen Charakteristika kaum vorherzusagen.
- d) In Regionen mit großflächigen, infizierten Kakaopflanzungen ist das Infektionspotential sowie der Einfluss auf bewirtschaftete Pflanzungen als sehr hoch einzuschätzen, insbesondere dann, wenn es sich um kleine „Inseln“ inmitten durchseuchter Gebiete handelt. Für eine effiziente Verringerung des Krankheitsbefalls ist es in diesen Fällen notwendig, phytosanitäre Maßnahmen übergreifend in der ganzen Anbauregion durchzuführen.
- e) In Gebieten mit räumlich verstreuten Kakaopflanzungen ist der Einfluss von infizierten Pflanzungen als Infektionsquelle geringer einzuschätzen. Bei weniger starkem Infektionsdruck kann man davon ausgehen, dass phytosanitäre Maßnahmen erfolgversprechend und wirtschaftlich durchzuführen sind, sofern die Kakaobäume auf einer handhabbaren Größe gehalten werden.
- f) Sehr hochwüchsige, ungeschnittene Kakaobäume sind aus wirtschaftlichen Aspekten praktisch nicht von Hexenbeseninfektionen zu bereinigen.

Die eigenen Untersuchungsergebnisse bezüglich der Wirkung unterschiedlich häufig durchgeführter Baumschnittmaßnahmen an Klonen auf Hexenbesenbefall zeigten, wie in Kapitel 3.3.5 dargestellt, nicht die erwarteten Ergebnisse. Sie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Wirkung von Schnittmaßnahmen an Einzelbäumen innerhalb der Versuchspflanzung konnte unter den gegebenen Bedingungen keine signifikanten Unterschiede aufweisen.
- Wie aus den Untersuchungsergebnissen oben (Abb. 4.1 und 4.2) ersichtlich wird, ist die Befallswahrscheinlichkeit mit Hexenbesen häufig um so höher, je näher sich die Wirtspflanze zur Infektionsquelle befindet. Im Falle des eigenen Untersuchungsaufbaues war

dieser „Nachbareffekt“ gegeben, da die unterschiedlichen Behandlungen nicht innerhalb einer räumlich abgegrenzten Pflanzung durchgeführt werden konnten.

- Im Gegensatz zu den Ergebnissen des IWBP hatten die unterschiedlichen Schnittmaßnahmen keinen Einfluss auf den Ertrag. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass aufgrund der Witterungsbedingungen während des Untersuchungszeitraumes sehr starke Produktionsschwankungen zu beobachten waren. Der außerordentlich starke Hexenbesenbefall im Jahr 1995 und die Trockenheit im Jahr 1996 hatten zudem wahrscheinlich einen stärkeren Effekt auf das Produktionsverhalten als die Schnittmaßnahmen selbst und waren möglicherweise statistisch nicht herauszumitteln. Zudem befanden sich die untersuchten Klone noch nicht in einer konsolidierten Ertragsphase. Besonders deutlich wird dies bei dem Klon ICS 8, der generell ausgesprochen spät in Ertrag geht.
- Die großen Unterschiede, die bezüglich der Sporulations- und Befallsintensität von Hexenbesen an den Standorten Sapecho und Tupiza festgestellt wurden, bestätigen auch die Unsicherheiten, selbst für eine geographisch abgegrenzte Region wie den Alto Beni Befallsprognosen zu treffen und allgemeingültige Hinweise zur Kontrolle zu geben.

Aufbauend auf den Ergebnissen der IWBP-Studien wurden Empfehlungen zum „Krankheitsmanagement“ formuliert, die auch mehr als 10 Jahre später weiterhin Grundlage von Forschungs- und Beratungsprogrammen vieler kakaoproduzierender Länder in Lateinamerika sind. Die wesentlichen Bestandteile dieser Empfehlungen werden im Folgenden beschrieben.

4.5 Empfehlungen zur Kontrolle der Hexenbesenkrankheit

Die verantwortlichen Wissenschaftler der IWBP-Studie²⁸ als Vertreter der wichtigsten kakao-produzierenden Länder Lateinamerikas kommen übereinstimmend zu dem Schluss, dass phytosanitäre Baumschnittmaßnahmen die wichtigste Sofortmaßnahme zur Eindämmung von Hexenbeseninfektionen darstellen. Diese allgemeine Feststellung muss jedoch in Beziehung zur Kosten/Nutzen Rechnung gestellt werden. AITKEN (1997) untersuchte diesen Zusammenhang in Bezug auf phytosanitäre und chemische Kontrollmaßnahmen für die Region Bahia und stellen fest, dass der alles entscheidende Faktor (neben der Effizienz der Maßnahmen selbst) die Relation von Lohnkosten zu Kakaopreis ist.

RUDGARD et al. (1993) betonen ebenfalls, dass der Weltkakaopreis den größten Einfluss auf die Intensität von Pflegemaßnahmen im Kakaoanbau hat. In Abhängigkeit der Intensität der Bewirtschaftung eines Kakaobetriebes unterscheiden sie 3 Managementsysteme nach den in Tab. 4.2 aufgeführten Kriterien.

Da es nach ihrer Ansicht sehr unwahrscheinlich ist, dass ein Produzent eines „Extensiv“- oder „Minimal“-Systems auf Grund seines niedrigen Produktionsniveaus lohn- oder kostenintensive Maßnahmen zur Verbesserung der Produktion vornehmen kann, gelten ihre Empfehlungen vornehmlich für Produzenten mit intensivem Managementsystem. Ferner differenzieren sie ihre Empfehlungen nach:

- Neupflanzungen,
- in Ertrag stehende Pflanzungen,
- Erneuerung alter Pflanzungen (Rehabilitierung).

²⁸ (für Brasilien Andebrhan, Costa, Carvalho & Albuquerque 1993:33ff), Kolumbien (Aranzazu & Buriticá, 1993:57ff) und Ekuador (Maddison, Macias, Moreira & Aragundi, 1993:73ff)

Tab. 4.2: Geschätzter Arbeitsaufwand für drei unterschiedliche Kakao Managementsysteme (nach Rudgard et al., 1993)

Managementsystem	Art der Bewirtschaftung	Arbeitstage/ha/Jahr
Extensiv	Unregelmäßige Erntetätigkeiten, Fermentierung und Trocknung	15
		5
	<i>Gesamtaufwand</i>	19
Minimal	Regelmäßige Erntetätigkeiten	22
	Fermentierung und Trocknung	5
	Gelegentliche Unkrautkontrolle	3
	Entfernen von Chupons	4
	<i>Gesamtaufwand</i>	34
Intensiv	Regelmäßige Erntetätigkeiten	30
	Fermentierung und Trocknung	6
	Regelmäßige manuelle Unkrautkontrolle	10
	Erhaltungsschnittmaßnahmen	8
	Entfernen von Chupons	4
	Schädlingskontrolle (chemisch)	4
	phytosanitäre Krankheitskontrollmaßnahmen ²⁹	–
	<i>Gesamtaufwand</i>	62

Die wesentlichen Empfehlungen zu

a) Neupflanzungen

Verwendung resistenten Pflanzmaterials, wo verfügbar; Formationsschnitt mit maximaler Kronenhöhe von 3,5–4 m; kontinuierliche Beseitigung von „Chupons“ im Stamm- und Kronenbereich; regelmäßige Durchführung phytosanitärer Schnittmaßnahmen; Pflanzdichte nicht über 1.200 Bäume ha⁻¹.

b) In Ertrag stehende Pflanzungen

Die hier aufgelisteten Empfehlungen müssen für jeden Standort individuell angepasst werden. Erhaltungsschnittmaßnahmen; Durchführung regelmäßiger Ernteintervalle; dort wo Bewässerungsmaßnahmen durchgeführt werden, sollten Bewässerungstechniken eingesetzt werden, die nicht die Blattoberfläche befeuchten (keine Beregnung). Die wichtigste Maßnahme ist jedoch die korrekte technische und zeitliche Durchführung phytosanitärer Schnittmaßnahmen, die den bedeutendsten Kostenfaktor darstellen. Als Anhaltspunkt und zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der zu treffenden Maßnahme wird folgende Relation von durchschnittlicher Anzahl infizierter Hexenbesenriebe/Baum und Arbeitsaufwand (Arbeitstage/ha), bezogen auf Verhältnisse im brasilianischen Amazonasgebiet angegeben (Tab. 4.3).

²⁹ siehe hierzu Tab. 4.3

Tab. 4.3: Geschätzter Arbeitsaufwand für phytosanitäre Schnittmaßnahmen zur Kontrolle von Hexenbesen in Kakaopflanzungen (nach RUDGARD et al., 1993)

Durchschnittliche Anzahl Hexenbesentriebe Baum ⁻¹	Aufwand für Baumschnitt Arbeitstage ha ⁻¹
5	13
10	17
20	26
50	35
100	50
200	63

Das Verhältnis C/p von Tageslohn (C) : Produzentenpreis (p)/1kg Trockenkakao ist in Rondonia/Brasilien von 3,6 im Jahr 1985 auf 8,5 im Jahr 1991 gestiegen, was dazu geführt hatte, dass selbst in Pflanzungen mit Erträgen von über 2 t ha⁻¹ phytosanitäre Maßnahmen wirtschaftlich nicht mehr zu vertreten waren.

Aufgrund der hohen Kosten ist dafür Sorge zu tragen, dass die phytosanitären Pflegemaßnahmen zum korrekten Zeitpunkt durchgeführt werden, um möglichst effektiv den Infektionszyklus des Hexenbesenpilzes zu unterbrechen. Je nach den spezifischen Klimabedingungen eines Standortes ist dieser Zeitpunkt zu bestimmen. Es werden zwei Schnittmaßnahmen empfohlen: ein Hauptschnitt vor Beginn der Regenzeit, der verhindern soll, dass nekrotische Hexenbesentriebe gegen Ende der Regenzeit bereits Sporen ausbilden können und gegebenenfalls ein Zweitschnitt vor Einsetzen der Haupterntezeit.

Tab. 4.4 fasst die Empfehlungen zusammen, die in Bezug auf den optimalen Zeitpunkt von phytosanitären Baumschnittmaßnahmen im Rahmen der IWBP Studie getroffen wurden, ergänzt durch eigene Empfehlungen auf Grundlage des Reproduktionszyklus des Hexenbesenpilzes (s. Kapitel 3.2.3) für den Standort Alto Beni/Bolivien.

Tab. 4.4: Empfehlungen für die Durchführung phytosanitärer Baumschnittmaßnahmen an Kakaopflanzen in Abhängigkeit des Standortes (modifiziert nach Rudgard et al., 1993)

Land/Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Brasilien/Amazonas								P	P		S	S
Brasilien/Bahía			P	P						P	P	
Ecuador (Küstenregion)							P	P	P		S	
Kolumbien		P	P				S					
Venezuela/Tachira			P									
Trinidad			P						S			
Grenada			P									
Bolivien	S	S							P	P		

P = Primärintervention
S = Sekundärintervention

c) Erneuerung alter Pflanzungen (Rehabilitierung)

Bei Rehabilitierungsmaßnahmen geht es darum, unproduktive Pflanzungen wieder in Ertrag zu bringen. Gründe für geringe Produktivität können im Fehlen von Managementmaßnahmen, Überalterung oder in massivem Hexenbesenbefall liegen. Niedrigwüchsige noch relativ junge Pflanzungen können über einen starken Rückschnitt und Formationsschnitt behandelt werden. Alte, sehr hochwüchsige Bäume oder solche mit schlechten Qualitätseigenschaften werden auf einer Höhe von 0,5 bis 1,5 m abgeschnitten, um das Wachstum von Chupons zu stimulieren. Gegebenenfalls kann in die Chupons veredelt werden.

Über die Intensität von Beschattung oder Artenzusammensetzung geeigneter Schattenbäume wurde keine konkrete Aussage getroffen.

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass vor allem auch im Hinblick auf die große Anzahl an „low input“ Betrieben, die sich teure Managementmaßnahmen nicht leisten können oder wollen, die langfristige Lösung des Hexenbesenproblems in der Resistenzauslese- und Züchtung liegt (RUDGARD et al., 1993).

In Anbetracht der großen genetischen Variabilität des Hexenbesenpilzes (PERES GRAMACHO et.al. 2005), des Einflusses des Standortes auf Hexenbesenbefall, der Beschattung (KRAUSS, U. and SOBERANIS, W., 2001) und Management (RUDGARD et al., 1993; AITKEN, M. 1997) sowie vieler weiterer Faktoren kann festgestellt werden, dass für jeden Standort eine Kombination aus den verschiedenen beschriebenen Maßnahmen zur erfolgreichen Kontrolle der Hexenbesenkrankheit zur erfolgen hat. Die hohe Toleranz der Klone SCA 6 und SCA 12 in Bahía, Brasilien gegenüber Hexenbesen (SURUYDEO-MAHARAJ, S. & UMAHARAN, P., 2004) stehen z. B. in Gegensatz zu der hohen Anfälligkeit dieser Klone in der Region Alto Beni (TRUJILLO, G., 2007)

Im folgenden werden Beispiele für die Installation von Agroforstsystemen mit Kakao beschrieben, die nach dem Prinzip der natürlichen Artenfolge aufgebaut werden, die in der Anbaupraxis in unterschiedlicher Art und Weise seit vielen Jahren in der Region Alto Beni mit Erfolg experimentiert werden (MILZ, J. 1997). Ziel des Aufbaus Sukzessionaler Agroforstsysteme ist die Annäherung an die komplexen und hoch diversifizierten natürlichen Agroökosysteme des tropischen Regenwaldes (ELBERS, J., 2002; OSTERROTH, M., 2002a,b; FIBL, 2002; PENEIREIRO, M., 1999; MILZ, J., 1997, 2002; SCHULZ, B. 1994; SCHULZ et.al., 1994; GÖTSCH, E., 1994; 1995; F) .

4.6 Beispiele für Agroforstsysteme mit Kakao

Der Aufbau von Agroforstsystemen mit Kakao und anderen „Hauptkulturen“ zur Vermarktung funktioniert im Wesentlichen nach den im Folgenden dargestellten Prinzipien.

Zusammen mit sog. Pionierarten wie Mais und Bohnen werden Baumsamenmischungen, bestehend aus allen Pflanzenkonsortien eines Systems (Arten mit unterschiedlichem Lebenszyklus), in Reihenabständen von ca. 2 bis 4 m dicht ausgesät. Zur Strukturierung der Pflanzung eignen sich Kulturen wie Ananas und Bananen ausgesprochen gut. Kakao als klassische Waldkultur sollte einen spezifischen Waldcharakter mit differenziertem Stockwerkaufbau aufweisen. Bei der Anlage ist immer vom Interesse des Landwirtes sowie den Vermarktungsmöglichkeiten des entsprechenden Produktes und den spezifischen Standortgegebenheiten auszugehen. Es ist wichtig, den Zeitraum sowie die Fläche des Feldes so zu nutzen, dass sowohl die Bodenfruchtbarkeit verbessert, als auch ein Einkommen erwirtschaftet werden kann, bis die „Hauptkultur“ (bezogen auf das Interesse des Produzenten) schließlich in Ertrag geht.

Bei dem folgenden Beispiel handelt es sich um die Neuinstallation einer Kakaopflanzung von 0,25 ha im Kolonisationsgebiet Alto Beni in der Area VII im November 1998 des Sr. Pedro Molle (Abb. 4.3 bis 4.5). In diesem Falle wurde das System während der ersten Jahre auf die Produktion von Bananen hin optimiert, da gute Vermarktungsmöglichkeiten dafür gegeben waren.

Zusammen mit Mais, Straucherbsen (*Cajanus cajan*), *Hibiscus sabdariffa* und *Canavalia ensiformis* wurden Bananen des Cavendish Typs sowie die hochwüchsigen und schattenliebenden *Manzano* gepflanzt.



Abb. 4.3: Pflanzung von Sr. Molle im Juni 2000 nach Durchführung von Pflege- und Erntearbeiten



Abb. 4.4: Kakaopflanzung von Sr. Molle zwei Jahre nach Installation im Nov. 2000



Abb. 4.5: Pflanzung im Febr. 2002, die ersten Kakaobäume gehen in Produktion

Zwischen die Bananenreihen sind die Obst und bäume gesät, später auch noch verschiedene, in Pflanzgärten vorgezogene Holz- und Fruchtbäume nachgepflanzt worden. Der aus Samen vorgezogene Hybrid-Kakao wurde Anfang 1999 in das bis dahin schon gut beschattete Feld zwischen die Bananenreihen in Abständen von 4 m x 4 m gepflanzt.

Die in Tab. 4.5 und 4.6 aufgeführten Beispiele zeigen unterschiedlichste Kombinationsmöglichkeiten für die Anlage neuer Kakaoparzellen. Kombinationen zwischen den Modellbeispielen sowie mit vielen anderen Kulturen sind möglich. Die fettgedruckten Kulturen sind in dem angegebenen Standjahr zu ernten.

Tab. 4.5: Beispiel 1 Kakaoanbau in SAFS

Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 5 – 10	ab Jahr 11
Mais				
Canavalia ensiformis				
Maniok				
Straucherbse				
Bixa orellana	Bixa orellana	Bixa orellana		
Ananas	Ananas	Ananas ³⁰		
Bananen	Bananen ³¹	Bananen	Bananen ³²	Bananen
Asaí (Euterpe spp.)	Asaí (Euterpe spp.)	Asaí (Euterpe spp.)	Asaí (Euterpe spp.)	Asaí
Bactris gasipaes	Bactris gasipaes	Bactris gasipaes	Bactris gasipaes	B. gasipaes
Kakao	Kakao	Kakao	Kakao	Kakao
Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume

³⁰ Im 3. Erntejahr werden ca. nur noch max. 40 % der Ausgangserträge geerntet.

³¹ Die Bananen werden zurückgeschnitten, um die Ananasproduktion zu fördern. Je nach Ausrichtung des Systems werden daher erst ab dem zweiten oder dritten Produktionsjahr Bananen in nennenswerten Mengen geerntet.

³² Die Bananen des Cavendish Typs werden aus dem System genommen und nur noch die des Manzano Typs verbleiben in der Pflanzung

Wie aus den Beispielen ersichtlich, ist es wichtig, den Zeitraum, bis der Kakao in Ertrag kommt, ökonomisch zu überbrücken, da erst frühestens ab dem 5. Jahr mit den ersten nennenswerteren Erträgen zu rechnen ist. Zudem ist es sinnvoll, auch innerhalb von sogenannten *cash crop* Kulturen Nahrungsmittel für den eigenen Konsum oder auch für lokale Märkte zu produzieren. In der Region Alto Beni ist die Kochbanane eine ökonomisch interessante Kultur, mit der sich ebenfalls während ca. 3 Jahren ein nennenswertes Einkommen in Kakaosystemen erzielen lässt.

Tab. 4.6: Beispiel 2 Kakaoanbau in SAFS

Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 5–10	ab Jahr 11
Mais				
Canavalia				
Straucherbse	Straucherbse			
Papaya	Papaya			
Bixa orellana	Bixa orellana	Bixa orellana		
Bananen	Bananen	Bananen	Bananen ³³	Bananen
Bactris gasipaes	Bactris gasipaes	Bactris gasipaes	Bactris gasipaes	B. gasipaes
Asaí (Euterpe spp.)	Asaí (Euterpe spp.)	Asaí (Euterpe spp.)	Asaí (Euterpe spp.)	Asaí
Kakao	Kakao	Kakao	Kakao	Kakao
Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume	Holz- und Frucht- bäume

In traditionellen Gummianbaugebieten (*Hevea brasiliensis*) wie Bahia, Brasilien oder dort, wo Naturgummi traditionell gezapft wurde, wie im Amazonasgebiet, werden Kakaopflanzungen gerne mit dieser Kultur kombiniert.



Abb. 4.6: Pfersichpalme (*Bactris gasipaes*) in Kakao-pflanzung des Verfassers

Im Falle der eigenen Kakaopflanzung konnten die Investitions- und Unterhaltungskosten weitestgehend aus der Bananenernte erwirtschaftet werden. Etwa im gleichen Jahr wie Kakao geht auch die Pfersichpalme (*Bactris gasipaes*) (Abb. 4.6) in Ertrag, die ein schmackhaftes Nahrungsmittel darstellt und gut auf den regionalen Märkten verkauft werden kann. Andere Palmenarten wie Asaí (*Euterpe spp.*) oder Majo (*Oenocarpus batataua*), aus denen sich hervorragend schmeckende Erfrischungsgetränke herstellen lassen, sind immer stärker am Markt gefragt. Gerade in der Integration unterschiedlichster Palmenarten liegt noch ein großes ökonomisches Potential zur Diversifizierung von Einkommensmöglichkeiten.

³³ wie in Fußnote 50

Da viele Palmenarten aufgrund ihrer spezifischen Mycorrhizapilze die Fähigkeit besitzen, Phosphor zu mobilisieren, sind diese ein überaus wichtiges Element in Agroforstpflanzungen. Bei *Bactris gassipaes* wurden vor allem Pilze der Gattung *Glomus* identifiziert, wobei die Intensität der Besiedlung von der Bodenart, dem P-Gehalt des Bodens sowie vom Produktionssystem abhängig zu sein scheinen (RUÍZ, P.O. 1993). MARINO et al. (2000) identifizierten ferner Bakterien (*Bacillus sp.* und *Gordonia sp.*) aus der Rhizosphäre von *Bactris*, die P aus Fe/Al-Phosphaten der Bodenlösung mobilisieren und damit pflanzenverfügbar machen können.

Für die Entwicklung von Strategien zur Lösung der vielfältigen Probleme in der landwirtschaftlichen Produktion ist ein differenziertes Verständnis für die komplexen Systemzusammenhänge, wie oben dargelegt, erforderlich. Der Anbau unter Anwendung der Prinzipien sukzessionaler Agroforstsysteme könnte eine langfristige Perspektive für die Landnutzung in feuchttropischen Gebieten darstellen, wobei nicht nur kurzfristige ökonomische, soziale oder strukturelle Zielvorgaben im Vordergrund stehen sollten.

5 Zusammenfassende Betrachtung und Ausblick

Die intensive Beschäftigung mit der Hexenbesenkrankheit über einen Zeitraum von über 20 Jahren mit der abschließenden Auswertung der eigenen Untersuchungen, in den Kontext der internationalen Hexenbesenforschung gestellt, wirft für mich mehr neue Fragen auf als im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden konnten. Nach intensiver Durchsicht der Literatur zur Hexenbesenforschung fällt aber auf, dass in keinem einzigen Fall die Frage nach den Ursachen, dem „Warum“, gestellt wurde. Der Fokus richtet sich auf den „Schaderreger“, der bis ins letzte Detail untersucht und erforscht wird, mit dem Ziel, Technologien der Bekämpfung – zur Aufrechterhaltung eines maximalen Ertragsniveaus – zu entwickeln. Im Falle des Hexenbesens ist dies jedoch weder den zahlreichen Wissenschaftlern, die sich mit der Thematik auseinandergesetzt haben, noch mir in befriedigender Weise gelungen. Selbstverständlich ist viel über die Epidemiologie des Erregers, die Krankheitssymptome und vieles mehr in Erfahrung gebracht worden und es konnten auch brauchbare Vorschläge zur Kontrolle entwickelt werden. Aber die Frage, warum nach einer gewissen Anbauzeit dermaßen gravierende Probleme in einer erwerbsmäßig angebauten Kultur auftreten konnten, ist meines Wissens nach bisher noch nicht gestellt worden. Dabei könnte möglicherweise die Lösung des Hexenbesenproblems ganz allein an einer Veränderung der Fragestellung liegen und damit verbunden in einer anderen Herangehensweise an die Problematik. Die eigenen Beobachtungen und Erfahrungen im Kakaoanbau, basieren auf systematisch durchgeführten Untersuchungen, zufälligen Beobachtungen sowie ebenfalls teils zufällig, teils gezielt durchgeführten Veränderungen in der Anbauweise auf dem eigenen Betrieb und in der Beratungsarbeit mit Kleinproduzenten. Sie führen zu der Schlussfolgerung, dass die Hexenbesenkrankheit möglicherweise nur eine „Antwort“ des Ökosystems auf eine Anbauform ist, die den Kakao vollständig aus seinem ursprünglichen Kontext herausgelöst und ihn dadurch erst in diese schwerwiegende Krise geführt hat. Das Problem wäre in diesem Fall dann nicht mehr der Hexenbesen, der auch keiner weiteren Aufmerksamkeit bedürfte, sondern das fehlende Wissen und Verständnis des Bauern, Beraters und Wissenschaftlers bezüglich größerer Systemzusammenhänge, in die der Kakaobaum eingebunden ist. Auch die oben dargestellte, mit viel Aufwand durchgeführte internationale Hexenbesenstudie als Essenz einer über 50-jährigen Forschung an dieser Kakaokrankheit, stellt ausschließlich die Symptombekämpfung in den Vordergrund ihrer Anstrengungen und reiht sich damit ein in die zahlreichen Forschungsbemühungen, die möglicherweise die eigentlichen Ursachen selbst aus dem Blickfeld verloren haben.

Eine erweiterte Betrachtungsweise gegenüber den bisherigen Forschungsansätzen und den darauf aufbauend zu entwickelnden Anbauformen könnte hilfreich sein, nach neuen Fragen

und damit neuen Lösungsansätzen zu suchen, um zumindest, was die pflanzenbauliche und ökologische Problematik betrifft, einen Schritt voranzukommen.

Von Beendigung der Datenerhebung im Dezember 1997 bis zum heutigen Zeitpunkt hat sich die eigene untersuchte Kakaopflanzung zu einem komplexen Agroforstsystem entwickelt, in dem der Kakao mittlerweile das ihm zustehenden „Stockwerk“ im Unterbau des Systems einnimmt. Die wichtigsten Pflegemaßnahmen, die in dieser Pflanzung noch durchgeführt werden, sind ein konsequentes Management der Bananen. Es erfolgt durch die Beseitigung alter Blätter, das Entfernen überflüssiger Schosse sowie durch einen Erhaltungsschnitt des Kakaos gegen Ende der Ernteperiode zwischen den Monaten August und September. Parallel zu diesen Erhaltungsschnittmaßnahmen werden die nicht laubabwerfenden Schattenbaumarten stark zurück geschnitten, um den Lichteinfall zu erhöhen und den Boden mit organischem Material anzureichern. Weiterhin werden Baumarten mit kürzerem Lebenszyklus nach und nach aus dem System entfernt.

Seit mehreren Jahren treten in dieser Pflanzung nur noch vereinzelt Hexenbeseninfektionen auf. Nichtgepflegte Pflanzungen ohne differenzierten Stockwerkaufbau und mit sehr geringer Artenvielfalt in direkter Nachbarschaft sind hingegen stark mit Hexenbesen infiziert. Trotz des anzunehmenden hohen Infektionsdrucks durch die große Anzahl sporulierender Hexenbesen aus den angrenzenden Pflanzungen sind keine bemerkenswerten Infektionen in der Agroforstpflanzung zu beobachten.

Ähnliche Beobachtungen konnten in den Agroforstpflanzungen von E. GÖTSCH im Norden Bahías gemacht werden. Dort weisen die Kakaobäume trotz eines hohen Infektionsdrucks durch Hexenbesen in der Region praktisch kaum Befallssymptome auf³⁴.

Diese langjährigen Beobachtungen untermauern die Hypothese, dass die Hexenbesenkrankheit möglicherweise Ausdruck für ein Ungleichgewicht des Systems ist und deren Kontrolle daher nur bedingt durch die Beseitigung infizierten Materials in Form von Schnittmaßnahmen oder durch den Einsatz toleranter oder resistenter Klone zu erreichen ist. Forschungsarbeiten zu den hier formulierten Hypothesen und Beobachtungen könnten einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, in Zukunft nicht nur weitere „Reparaturmaßnahmen“ zu entwickeln, sondern zu versuchen, die Probleme an der Wurzel zu lösen. Ein wichtiger Hinweis kann darin gesehen werden, dass je näher sich ein Produktionssystem dem originären Ökosystem annähert, viele Probleme bezüglich des Rückgangs von Bodenfruchtbarkeit, Krankheiten, Schädlinge und Unkräutern abnehmen. Dies bedeutet, dass hierzu systemisch

³⁴ Diese Beobachtungen konnte ich persönlich während Feldbesuchen in 1996 und 2003 in den Pflanzungen von E. Götsch sowie in der näheren Umgebung machen

orientierte Forschungsansätze zu entwickeln sind, die versuchen sollten die vielfältigen Interaktionen komplexer Anbausysteme zu untersuchen um darauf aufbauend nachhaltige Anbaumethoden zu empfehlen.

Im Rahmen eines langfristig angelegten Feldforschungsprojektes das in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Forschungsinstitut für ökologischen Landbau FIBL, dem Instituto de Ecología La Paz, der Fundación PROINPA, La Paz und dem Dachverband der ökologisch produzierenden Anbauverbände Boliviens AOPEB im Alto Beni, Bolivien Ende 2007 begonnen wurde, soll dieser Fragestellung auf den Grund gegangen werden (ZUNDEL, Ch. et. al., 2007). Hierzu werden wissenschaftliche Exaktversuche mit 4 Wiederholungen von unterschiedlichen Anbausystemen mit Kakao auf insgesamt über 6 ha Anbaufläche angelegt (konventionell intensiv, organisch intensiv, organisch extensiv, sukzessionales Agroforstsystem) und über einen Zeitraum von 10 bis 20 Jahren wissenschaftlich begleitet. Der standardisierte Versuchsaufbau mit Kakaoklonen und Kakaohybriden, ausgehend von neu zu installierenden Pflanzungen kann einen großen Beitrag dazu leisten, die in dieser Arbeit aufgeworfenen Fragestellungen zu beantworten.

6 Zusammenfassung

Die Hexenbesenkrankheit (*Crinipellis pernicioso*) ist eine Pilzkrankheit, die nur meristematisches Pflanzengewebe des Kakaobaumes an Trieben, Blüten und Früchten befällt. Sie tritt bisher ausschließlich auf dem Lateinamerikanischen Kontinent auf und verursacht dort erhebliche Verluste in vielen Kakaoanbaugebieten. Für die Region des Alto Beni im feuchttropischen Tiefland Boliviens, in der die Untersuchungen zu dieser Arbeit durchgeführt wurden, stand die Bekämpfung des Hexenbesenpilzes während vieler Jahre im Blickpunkt des Interesses. Die mit mäßigem Erfolg durchgeführten Maßnahmen zur Kontrolle dieser Pilzkrankheit in den betroffenen kakaoproduzierenden Ländern zeigten, dass nur ein besseres Verständnis der komplexen Interaktionen zwischen Witterung, Inokulum und Phänologie der Wirtspflanze es ermöglichen würde, effiziente und ökonomisch vertretbare Kontroll- und Bekämpfungsprogramme zu entwickeln.

Die bisher international gängigen Maßnahmen, die Hexenbesenkrankheit durch Baumschnitte sowie durch die Verwendung toleranter Klone zu bekämpfen, wurden für die Region Alto Beni wissenschaftlich untersucht. Die Ergebnisse, in den Kontext zur internationalen Hexenbesenforschung gestellt und diskutiert, führten zur Entwicklung alternativer Anbauformen unter Berücksichtigung von ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeitskriterien.

Der Hexenbesenpilz durchläuft in seiner Entwicklung eine klar differenzierte vegetative (parasitäre) und eine generative (saprophytische) Phase. Beide Entwicklungsphasen werden wesentlich durch die Niederschlagsverhältnisse beeinflusst.

Die vegetative Phase des Hexenbesenpilzes wurde an Hybridkakaobäumen durch Beobachtung der Entwicklung befallener Triebe im Feld an zwei Standorten, Sapecho und Tupiza untersucht. Die Untersuchungen zur generativen Phase erfolgten an den abgestorbenen Hexenbesen, die jeweils aus der Baumkrone entfernt und am Rand der untersuchten Kakaopflanzungen aufgehängt und beobachtet wurden. Die Untersuchungen zum Reproduktionszyklus des Hexenbesenpilzes und die Auswertung der Klimadaten fanden während des Zeitraumes von 1991 bis 97 statt. Die Ergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen Niederschlagsereignissen und der Ausbildung von Fruchtkörpern an Hexenbesen. Es konnte im gesamten Untersuchungszeitraum jedoch kein kausaler Zusammenhang zwischen der Intensität von Fruchtkörperbildungen an Hexenbesentrieben und der Anzahl an Hexenbeseninfektionen der untersuchten Bäume festgestellt werden. Der Hexenbesenbefall an Kakaotrieben war am Standort Sapecho während des gesamten Untersuchungszeitraumes signifikant höher als am Standort Tupiza.

Von 1994 bis 97 wurden die Kakaoklone ICS 1, ICS 6, ICS 8, ICS 95 und TSH 565 unter Feldbedingungen auf Hexenbesentoleranz und Ertrag am Standort Sapecho untersucht. Zusätzlich wurden unterschiedliche Baumschnittfrequenzen auf ihre Effizienz hinsichtlich des Ertragsverhaltens der Klone und der Auswirkung auf Hexenbeseninfektionen überprüft. Die fünf Klone zeigten sowohl signifikante Unterschiede in Bezug auf ihre Anfälligkeit gegenüber Hexenbesen als auch in ihrem Ertragsverhalten. Die unterschiedliche Schnitthäufigkeit zeigte dagegen weder statistisch abgesicherte Differenzen hinsichtlich der Anzahl von Hexenbeseninfektionen noch hatte sie Einfluss auf den Ertrag.

Weder die eigenen Untersuchungen zu dieser Arbeit noch die vielen auf internationaler Ebene durchgeführten Forschungsarbeiten konnten die Hexenbesenproblematik im Kakaoanbau grundlegend lösen. Empfehlungen zur Kontrolle dieser Pilzkrankheit beschränken sich im wesentlichen nach wie vor auf die Durchführung von phytosanitären Baumschnittmaßnahmen und der Suche nach tolerantem oder resistentem Pflanzenmaterial.

Die bisher gewonnen Erfahrungen im Landbau unter Anwendung der Prinzipien sukzessionaler Agroforstsysteme könnten hier möglicherweise eine langfristige Perspektive für die Landnutzung in tropischen Regionen und zur Reduzierung phytosanitärer Probleme darstellen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit bolivianischen Institutionen und der Forschungsanstalt für Biologischen Landbau FIBL, Schweiz, sollen unterschiedliche Anbausysteme mit Kakao experimentiert und wissenschaftlich untersucht werden. Diese Forschungsarbeiten, die 2007 begonnen wurden, könnten einen wichtigen Beitrag zur Lösung der Hexenbesenproblematik und anderer phytosanitärer Probleme im Kakaoanbau leisten.

Resumen

La enfermedad „escoba de bruja“ (*Crinipellis perniciosa*) es una micosis que sólo ataca al tejido vegetal meristémico de los brotes, flores y fruto del árbol del cacao. Tal enfermedad aparece sólo en el continente latinoamericano donde causa grandes pérdidas en muchas regiones donde se cultiva el cacao. En la región de Alto Beni, zona tropical húmeda de las tierras bajas de Bolivia donde se realizaron los trabajos de investigación que son objeto de esta disertación, la lucha contra esta micosis fue de vital interés durante muchos años. El poco éxito que tuvieron las numerosas medidas para controlar esta micosis en los países productores de cacao, demuestra que el elaborar programas eficientes y ecológicamente sostenibles para el control y combate de este hongo es posible sólo con una mejor comprensión de la compleja interacción entre clima, infección y fenología de la planta huésped.

El objetivo principal de este trabajo fue investigar científicamente las medidas que se aplicaron en la región de Alto Beni para controlar la „escoba de bruja“ (*Crinipellis perniciosa*), vale decir las podas fitosanitarias en los árboles y la implementación de diferentes clones tolerantes. Es también un objetivo dar a conocer y debatir estos resultados en el contexto internacional de las investigaciones de esta enfermedad, todo ello con el fin de encontrar formas alternativas de cultivo de cara al logro de una producción de cacao ecológicamente sostenible y económicamente rentable.

En su desarrollo “la escoba de bruja” pasa por dos fases claramente diferenciadas: una vegetativa (parasitaria) y otra generativa (saprofitaria). Las precipitaciones pluviales influyen fuertemente en ambas fases de desarrollo. La fase vegetativa de la micosis que nos ocupa se investigó en trabajo de campo en árboles híbridos de cacao habiéndose observado el desarrollo de los brotes afectados. La fase generativa se investigó en los brotes muertos, los mismos que fueron extraídos de las copas de los árboles y colgados en las laderas de las plantaciones de cacao para su observación. Se realizó un recuento semanal del cuerpo fructífero de los hongos y, además, se levantaron registros tanto de observaciones fenológicas tales como crecimiento, florecencia y desarrollo frutal en los árboles de cacao, como así de datos climáticos. Estos trabajos se realizaron en dos diferentes lugares situados en Alto Beni: en Sapecho y Tupiza. Las investigaciones del ciclo reproductivo del hongo „escoba de bruja“ y el análisis de los datos climáticos se efectuaron en el periodo comprendido entre 1991 y 1997. Sus resultados demuestran que existe una relación entre las precipitaciones y la formación de cuerpos fructíferos en el hongo citado. Por otro lado, durante todo el periodo de investigación no se pudo detectar una relación causal entre la intensidad de la formación de cuerpos fructíferos en los brotes de los hongos y la incidencia infectiva de la “escoba de bruja” en los árboles investigados.

Entre 1994 y 1997, además, se investigaron en Sapecho - bajo condiciones de estudio en campo - los clones de cacao ICS 1, ICS 6, ICS 8, ICS 95 y TSH 565 y su tolerancia en cuanto a la “escoba de bruja”, como así su rendimiento. Adicionalmente se analizó la eficiencia de las diferentes frecuencias de podas fitosanitarias y su incidencia en el rendimiento de los clones y en las infecciones de la “escoba de bruja”. Los cinco clones mostraron diferencias significativas tanto en su propensión a la „escoba de bruja“ como en su rendimiento. Las diferentes frecuencias de poda, al contrario, no mostraron diferencias que pudieran probarse estadísticamente en lo que respecta al número de infecciones con „escobas de bruja“, tampoco tuvieron incidencia en el rendimiento.

Ni las investigaciones descritas arriba ni las tantas investigaciones internacionales relacionadas a la problemática de este hongo han podido encontrar una solución sustancial de este problema. Sin embargo una posible solución del complejo de problemas - tanto de ataques de plagas y enfermedades como también de fertilidad de suelos - puede radicar en la implementación de los principios de sistemas agroforestales sucesionales, los cuales han sido experimentados con éxito durante la última década.

El Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica FIBL, Suiza en cooperación con instituciones Bolivianas está emprendiendo un proyecto a largo plazo de comparación de sistemas de reproducción de cacao en la region Alto Beni, Bolivia. Mediante este proyecto se busca, entre otras cosas, respuestas relacionadas a problemas fitosanitarias y productivas en el cultivo de cacao, considerando la sostenibilidad de los sistemas de producción a largo plazo.

Summary

The witches' broom disease (*Crinipellis perniciosa*) is a fungal infection which only affects the meristematic plant tissues of the shoots, flowers and fruits of the cocoa tree. To date it has been restricted to the Latin American continent, where it causes considerable losses in many cocoa cultivation regions. In the Alto Beni region in the humid tropical lowlands of Bolivia where the research in connection with this work was undertaken, the fight against the witches' broom fungus has been a focus of interest for many years. The measures, undertaken with moderate success, to control this fungal infection in the affected cocoa-producing countries have shown that only a better understanding of the complex interactions between the weather conditions, inoculum and phenology of the host plant would make it possible to develop efficient and economically viable programmes for controlling and fighting the infection.

The aim of this work was to examine scientifically the measures undertaken in the Alto Beni region, to curb the witches' broom disease (*Crinipellis perniciosa*) by phytosanitary pruning measures and by the use of various tolerant clones, and to present the results for discussion in the context of the international fight against witches' broom disease, as well as seeking alternative agricultural methods for the ecologically adapted and economically viable production of cocoa.

During its development, witches' broom disease progresses through clearly distinguished vegetative (parasitic) and generative (saprohytic) phases. Both phases of development are essentially affected by the rainfall conditions. The vegetative phase of the witches' broom fungus was examined on hybrid cocoa trees by observation in the field of the development of infested shoots. The investigations into the generative phase were undertaken on the witches' brooms once they had died and been removed from the canopy of the trees, hung up at the edge of the cocoa plantations being studied, and observed. The fruiting bodies (basidiocarps) of the fungus were counted at weekly intervals. Phenological observations, such as the growth, flowering and formation of fruit on cocoa trees, and climatic data, were also recorded. These works were undertaken in two different locations of the Alto Beni region, in Sapecho and Tupiza. The investigations into the reproduction cycle of the witches' broom fungus and the evaluation of the climatic data took place during the period between 1991 and 97. The results show a connection between rainfall levels and the formation of basidiocarps on the witches' broom. However, over the whole of the investigation period, no causal connection was found between the intensity of basidiocarp production on the witches' broom shoots and the number of witches' broom infections on the trees under investigation.

From 1994 to 97, the cocoa clones ICS 1, ICS 6, ICS 8, ICS 95 and TSH 565 were also studied under field conditions at the Sapecho location for witches' broom tolerance and yield. In addition, various pruning frequencies were examined for their efficiency with regard to the yields of the clones and the effects on witches' broom infection. The five clones showed significant differences both in relation to their susceptibility to witches' broom and in their yields. The different pruning frequencies, on the other hand, did not show any statistically provable differences in terms of the number of witches' broom infections, nor did they influence the yields.

It has become clear that neither the own studies nor the many research works undertaken at an international level were able to find a fundamental solution to the witches' broom problem. Agriculture using the principles of successional agroforestry systems could represent a long-term perspective for land use in these areas, with the emphasis on more than short-term economic, social or structural objectives. The Research Institute for Organic Farming FIBL, Switzerland in cooperation with different bolivian institutions are setting up longterm farming systems comparison field trials in the Alto Beni region in Bolivia. The project wants to contribute to strengthening sustainable agriculture related to cocoa production systems and to provide solid information concerning the solution of phytosanitary problems.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Symptome von Hexenbesen an Trieben.....	12
Abb. 2.2: Symptome von Hexenbesen an Blüten.....	12
Abb. 2.3: Hexenbesenbefall an junger Kakaofrucht	13
Abb. 2.4a/b: Fruchtkörper an Hexenbesen.....	14
Abb. 2.5: Zeitdauer der Zersetzung von abgestorbenen Hexenbesentrieben unter Feldbedingungen in Ekuador (HEDGER, 1987:321)	18
Abb. 3.1: Das Siedlungsgebiet Alto Beni	32
Abb. 3.2: Lage des Siedlungsgebietes Alto Beni im Nordosten Boliviens (ELBERS, 2002)....	33
Abb. 3.3: Skizze des Lageplans der untersuchten Kakaoklone sowie der 10 Hybridkakaobäume der Kakaopflanzung Milz am Standort Sapecho.....	41
Abb. 3.4: Untersuchungen zur Dynamik der Hexenbesenkrankheit in Kakaopflanzungen (Standorte Sapecho und Tupiza) sowie des Einflusses von Baumschnittfrequenzen auf verschiedene Kakaoklone (Standort Sapecho)	44
Abb. 3.5: Untersuchungsgerüst für Hexenbesen.....	46
Abb. 3.6: Schematische Darstellung der Anordnung und Kennzeichnung von abgestorbenen Hexenbesen an Untersuchungsrahmen	47
Abb. 3.7: Kakaoklon ICS 1	51
Abb. 3.8a und 3.8b: Kakaoklon ICS 6	51
Abb. 3.9: Kakaoklon ICS 8	52
Abb. 3.10: Kakaoklon ICS 95	52
Abb. 3.11: Kakaoklon TSH 565.....	53
Abb. 3.12: Niederschlag und durchschnittliche monatliche Temperaturwerte von 1991 bis 1996 am Standort Sapecho (Daten Klimastation „EL CEIBO“ – Sapecho).....	54
Abb. 3.13: Jahresniederschlagssummen von 1991–97 an den Standorten Sapecho und Tupiza.....	55
Abb. 3.14: Extreme maximale, minimale und durchschnittliche monatliche Temperaturwerte in Sapecho im Jahr 1996	56
Abb. 3.15: Intensität und Perioden des Triebwachstums von Kakaobäumen von 1990–97 am Standort Sapecho	58
Abb. 3.16: Mittleres Triebwachstum (Flushing) an Hybridkakaobäumen von 1990–97 und Triebwachstumskurve des Trockenjahres 1996 am Standort Sapecho.....	58

Abb. 3.17: Blüten- und Fruchtentwicklung an Kakaobäumen im Zeitraum 1990–97 am Standort Sapecho	59
Abb. 3.18: Dauer der vegetativen Phase des Hexenbesens an infizierten Kakaobäumen vom Zeitpunkt der Symptombildung bis zur vollständigen Dehydrierung am Standort Sapecho	60
Abb. 3.19: Durchschnittliche Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper von Hexenbesen an Kakaobäumen am Standort Sapecho in Abhängigkeit der Dauer ihrer Präsporulationsphase	61
Abb. 3.20: Durchschnittliche Anzahl sporulierender Hexenbesentriebe im Untersuchungszeitraum 1990–96 im Jahresverlauf und mittlere Niederschlagswerte am Standort Sapecho	63
Abb. 3.21: Durchschnittliche monatliche Anzahl sporulierender Hexenbesentriebe und Niederschläge im Zeitraum 1990–97 am Standort Sapecho.....	64
Abb. 3.22: Anzahl durchschnittliche ausgebildeter Fruchtkörper von Hexenbesentrieben pro Sporulationsereignis am Standort Sapecho in Abhängigkeit von der Jahreszeit	66
Abb. 3.23: Vergleich des Hexenbesenbefall an Kakaotrieben von Hybridbäumen an den Standorten Sapecho und Tupiza im Zeitraum 1992 bis 1996.....	70
Abb. 3.24: Mittelwert der Anzahl ausgebildeter Fruchtkörper · Hexenbesen ⁻¹ an den Standorten Sapecho und Tupiza im Zeitraum 1992–96.....	70
Abb. 3.25: Gesamtzahl an Triebinfektionen mit Hexenbesen im Untersuchungszeitraum 1994–97 an 5 Kakaoklonen (Mittelwert/Baum) am Standort Sapecho	73
Abb. 3.26: Durchschnittliche Anzahl an Hexenbeseninfektionen pro Baum an 5 Kakaoklonen im Zeitraum 1994–97 am Standort Sapecho	73
Abb. 3.27: Einfluss von Schnittmaßnahmen auf Triebinfektionen mit Hexenbesen an Kakaoklonen während des Untersuchungszeitraumes 1994–97 am Standort Sapecho..	74
Abb. 3.28: Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Ertragsleistung von fünf Kakaoklonen (g/frische Kakaosamen) von 1994–97 am Standort Sapecho	75
Abb. 3.29: Durchschnittliche jährliche Kakaoerträge (frische Kakaosamen) der untersuchten Klone (g/Baum) im Zeitraum 1994–97 am Standort Sapecho	76
Abb. 3.30: Einfluss der Anzahl von Schnittmaßnahmen auf die durchschnittliche jährliche Ertragsleistung von Kakaoklonen während des Zeitraumes 1994–97 am Standort Sapecho.....	78

Abb. 4.1: Die Diagramme zeigen das Verhältnis der Steigung des Kurvenverlaufs von mit Hexenbesen infizierten Kakaokeimlingen in verschiedenen Höhenpositionen und Entfernungen zu in unterschiedlicher Höhe positionierten Infektionsquellen an. Zur Berechnung des Gesamtverhältnisses der Infektionen muss der Wert der Kurvensumme auf der y-Achse durch 4 dividiert werden. Rio Negro, Manaus, Brazil (ANDEBRHAN et al., 1993:160).....	94
Abb. 4.2: Befallsgradienten von Hexenbeseninfektionen (Prozent) an Kakaosetzlingen in Bodenhöhe, in Abhängigkeit ihrer Verweildauer (14, 21 und 42 Tage) innerhalb einer von Hexenbesen gesäuberten Kakaopflanzung und in unterschiedlicher Entfernung zu einer stark mit Hexenbesen infizierten Kakaopflanzung in „Palma Chávez“, Ekuador (ANDEBRHAN et al., 1993:163)	95
Abb. 4.3: Pflanzung von Sr. Molle im Juni 2000 nach Durchführung von Pflege- und Erntearbeiten.....	104
Abb. 4.4: Kakaopflanzung von Sr. Molle zwei Jahre nach Installation im Nov. 2000.....	104
Abb. 4.5: Pflanzung im Febr. 2002, die ersten Kakaobäume gehen in Produktion	105
Abb. 4.6: Pfirsichpalme (<i>Bactris gassipaes</i>) in Kakaopflanzung des Verfassers.....	106

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Entwicklung der Produktionsmengen der wichtigsten kakaoproduzierenden Länder (in 1000 t) von 1974/75 bis 2001/02 (Gill & Duffus. Previsions Commodity Information, Inc. 2001; Icco, 2002/03).....	6
Tab. 2.2: Jährlicher Nährstoffentzug des Bodens in kg bei 1000 kg/ha Ernteertrag (TOXOPEUS & LEMS, 1989)	9
Tab. 2.3: Nährstoffentzug bezogen auf 1000 kg Ernte (WOOD, 1973)	9
Tab. 2.4: Geschätzte jährliche Ernteverluste, verursacht durch die wichtigsten Kakaokrankheiten (BOWER et.al., 2001)	10
Tab. 2.5: Chemische Verbindungen, die auf ihre Effizienz zur Kontrolle von Hexenbesen untersucht wurden (Aitken, 1997)	28
Tab. 2.6: Kosten (ha ⁻¹) für integrale Pflanzenschutzmaßnahmen zur Bekämpfung der Hexenbesenkrankheit in Kakaopflanzungen, differenziert nach Befallsgrad (vereinfacht nach AITKEN, 1997)	31
Tab. 3.1: Legende zu Lageplan Abb. 3.5. Die untersuchten Kakaoklone sind nach ihrer Position in den Pflanzreihen aufgeführt.....	42
Tab. 3.2: Boniturskala zur Bewertung des Fruchtansatzes an Hybridbäumen.....	45
Tab. 3.3: Baumschnittfrequenzen an Kakaoklonen	49
Tab. 3.4: Untersuchungsergebnisse an Hexenbesen von April 1990 bis Oktober 97	65
Tab. 3.5: Beschreibung der Faktoren	67
Tab. 3.6: Untersuchte Variable in Bezug auf Ausbildung von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben (n=60)	67
Tab. 3.7: Matrix der Koeffizienten einfach linearer Korrelation und Irrtumswahrscheinlichkeiten.....	68
Tab. 3.8: Test nach „Wald“ für die Anzahl von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben	69
Tab. 3.9: Mittelwertvergleich von Hexenbesensymptomen an Kakaotrieben zwischen den Untersuchungsjahren und zwischen den Standorten Sapecho und Tupiza.....	69
Tab. 3.10: Varianztabelle zur Schätzung des Regressionskoeffizienten und Untersuchung des Einflusses der Parameter Niederschlag und Wert Flushing auf die Symptomausbildung von Hexenbesen in der untersuchten Stichprobe.....	71
Tab. 3.11: Varianzanalysentabelle für Klone, Behandlungseffekte und Jahre sowie Interaktionen in Bezug auf Hexenbesenbefall an untersuchten Kakaoklonen am Standort Sapecho	72

Tab. 3.12: Vergleich der untersuchten Klone auf Anfälligkeit für Hexenbesenbefall nach dem Tukey Test (Differences of Least Squares Means)	73
Tab. 3.13: Varianzanalysentabelle für Behandlungseffekte in Bezug auf Ertrag an untersuchten Kakaoklonen am Standort Sapecho.....	75
Tab. 3.14: Vergleich der F Werte des Ertragsverhaltens unterschiedlicher Klone am Standort Sapecho nach dem Tukey Test (Differences of Least Squares Means)	77
Tab. 4.1: Dauer bis Sporulationsbeginn von Hexenbesen nach Beginn der Regenperiode an unterschiedlichen Standorten in Lateinamerika (modifiziert nach Rudgard et al., 1993).....	82
Tab. 4.2: Geschätzter Arbeitsaufwand für drei unterschiedliche Kakao Managementsysteme (nach Rudgard et al., 1993).....	100
Tab. 4.3: Geschätzter Arbeitsaufwand für phytosanitäre Schnittmaßnahmen zur Kontrolle von Hexenbesen in Kakaopflanzungen (nach RUDGARD et al., 1993)	101
Tab. 4.4: Empfehlungen für die Durchführung phytosanitärer Baumschnittmaßnahmen an Kakaopflanzen in Abhängigkeit des Standortes (modifiziert nach Rudgard et al.,1993).....	101
Tab. 4.5: Beispiel 1 Kakaoanbau in SAFS.....	105
Tab. 4.6: Beispiel 2 Kakaoanbau in SAFS.....	106

Literaturverzeichnis

- AHNERT, D., CORREA, R. (2003): Variabilidade em clones de cacaueiros reistentes à vassoura-de-bruxa com base em caracteres agronomico.
In: Congresso Brasileiro de Melhoramento de Plantas, 2003, Porto Seguro. Congresso Brasileiro de Melhoramento de Plantas, 2003. v. 2.
- AHNERT, D. (2000): Use of QTLs for Witches' Broom Resistance in Cocoa Breeding.
In: International Workshop on New Technologies and Cocoa Breeding, 2000, Kota Kinaballu, Sabah, Malaysi. Proceedings of the International Workshop on New Technologies and Cocoa Breeding. London : INGENIC, 2000. p. 116–119
- AITKEN, M (1997): Chemical & Phytosanitation control of witches' broom for cocoa.
Paper presented at the Workshop "CURRENT KNOWLEDGE AND PROGRAMS ON WITCHES' BROOM CONTROL". by ACRI, CAOBISCO & IOCCC. Miami, Florida 19, 20 Februar 1997
- ALMEIDA de L.C. (1987): Sobrevivencia do *Crinipellis pernicioso* durante a fermentação do cacau.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 359-362
- ALMEIDA de H.A., MACHADO, R.C.R., SILVA da, W.S. (1987): Influencia dos Elementos meterológicos na floração de Cacaueiro (*Theobroma Cacao* L).
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 93-98
- ALMEIDA L.C.; ANDEBRHAN, T. (1987): Recueração de plantações de cacau com alta incidencia de vassoura-de-bruxa na amazonia brasileira.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 337-339
- ALVES, S.A.M.; PONIELLA, A.W.V.; AITKEN, W.M.; FILHO, A.B.: (2006): Curvas de progresso e gradientes da vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso*) em cacaueiros exentados em Urucuá, Bahia.
Fitopatología Brasileira 31 (5): 483–491. Brasília 2006
- ALVIM, P.T. (1987): Relacoes entre fatores climaticos e producao do cacaueiro.
In: 10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 159–167
- ANDEBRHAN, T. (1987): Cultural characteristics and biochemical reactions of isolates of *Crinipellis pernicioso*, causative agent of witches'broom disease of cocoa.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 363-366
- ANDEBRHAN, T. (1981a): Relacao entre a Idade do Fruto do Cacaueiro e Suscetibilidade a *Crinipellis pernicioso*.
CEPEC, Informe Técnico 1981, Itabuna-Bahia-Brasil 1982, S.315–316

- ANDEBRHAN, T. (1981b): *Verticillium lamellicola* (F.E. Smitz) W. Gams um Novo Hiperparasita de Basidiocarpos de *Crinipellis pernicioso* (STAHEL) Singer.
CEPEC Informe Técnico 1982, Itabuna-Bahia-Brasil, S.303–306
- ANDEBRHAN, T. (1982): Epidemiologia de Vassoura de bruxa.
Informe Técnico 1982, Itabuna-Bahia-Brasil 1982, S.314–321
- ANDEBRHAN, T. (1987): Rain-water as a factor in the dissemination of basidiospores of *Crinipellis pernicioso* (STAHEL) SINGER within cacao trees.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.367-369
- ANDEBRHAN, T.; PIMENTEL, E. (1982): Producao de primórdios de basidiocarpos de *C.pernicioso* „in vitro”.
CEPEC Informe Técnico 1982, Itabuna-Bahia-Brasil, S.313
- ANON (1992): Cocoa Market Report, September 1992 No. 394. E.D. & F. Man, London, U.K.
- ANDEBRHAN, T., COSTA, J.C.B. , CARVALHO A.L.P. & ALBUQUERQUE, P. (1993)
in: RUDGARD, MADDISON & ANDEBRHAN (1993) p.50: Disease Management in Cocoa. Comparative epidemiology of witches' broom. Chapman & Hall 1993
- ANDEBRHAN,T.; MADDISON, ARIAS & MAFFIA (1993) in: RUDGARD, MADDISON & ANDEBRHAN (1993) Disease Management in Cocoa. Comparative epidemiology of witches' broom pp 157–164.:
Chapman & Hall 1993
- ANTÚÑEZ DE MAYOLO, G. (2003): Genetic engineering of *Theobroma cacao* and Molecular studies on cacao defense responses. Pennsylvania State University. A thesis in integrative Biosciences submitted in partial fulfillment of the requirement for the Degree of Doctor of Philosophy, 2003.
- ARAGUNDI, J.; FRIAS, G; SOLORZANO, G; SCHMIDT, R.; PURDY, L.H. (1987): Estudios sobre gradiente de infección y dispersión de la escoba de bruja del cacao en el Ecuador.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, pp. 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.375-379
- ARANZAZU H., F. (1981a): Algunos Aspectos de la Biología de *Crinipellis pernicioso* (STAHEL), SINGER en la Región de Uraba (Colombia).
8th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Cartagena-Colombia.
- ARANZAZU H., F. (1981b): Análisis de la Evolución y Variación de la Incidencia de Escoba de Bruja (*Crinipellis pernicioso*) en la Región de Urabá (Colombia);
8th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Cartagena, Colombia
- BAKER, R.E.D., CROWDY, S.H. & THOROLD, C.A. (1941): Witches' broom disease investigations. I. Seasonal variations in the intensity of infections and their effect on control measures.
Tropical Agriculture Trinidad 18, 107–116
- BAKER, R.E.D.; HOLLIDAY, P. (1957): Witches' broom disease of cocoa (*Marasmius pernicioso* Stahel).
Phytopathological Paper No 2, Commonwealth Mycological Institute, Kew

- BALASIMHA, D. (1987): Water Relations, Growth and other Indicators of Plant Water Stress in Cocoa Under Drought.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.215-217
- BASTOS, C.N. (1980): Efeito da toxina de *Cladobotrym amazonense* sobre *Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer e outros fitopatógenos.
CEPEC Informe Técnico 1980, Itabuna-Bahia-Brasil 1982, S. 317–319
- BASTOS, C.N. (1987): Efeito inibitório de extratos de cultivares de cacau e compostos fenólicos sobre a germinação de basidiosporos de isolados de *Crinipellis perniciosa*.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.371-374
- BASTOS, C.N.(1982): Influencia da temperatura na liberacao e germinacao de basidiósporos de *Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer.
CEPEC, Informe Técnico 1980, Itabuna-Bahia-Brasil
- BASTOS, C.N.; ANDEBRHAN, T. (1980): Presença de Giberelina em basidiósporos de *Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer.
CEPEC, Informe Técnico 1980, Itabuna-Bahia-Brasil 1982, S.307
- BASTOS, C.N.; EVANS, H.C. (1985): A new pathotype of *Crinipellis perniciosa* (witches'broom disease) on solanaceous hosts.
Plant Pathology 34, 306–312
- BÄTZ, G.; Autorenkollektiv (1987): Einführung in die Methodik des Feldversuchs. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- BENTES-GAMA, M.; SOMARRIBA, E.; PINTO, W.; PASTRANA, A. (2005): Estado y manejo de nuevas plantaciones de cacao injertado en Alto Beni, Bolivia.
Agroforestería en las Americas. 44–45: 67–71. CATIE, Turrialba, Costa Rica 2005
- BORIS, H und LIBBERT, E. (1985): Wörterbuch der Biologie. Pflanzenphysiologie. Uni-Taschenbücher 1344, Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart
- BOS, M.; STEFFAN-DEWENTER, I.; TSCHARNTKE, T. (2007): Shade tree management affects fruit abortion, insect pests and pathogens of cacao.
Agriculture, Ecosystems and Environment 120 (2007): 201–205. www.science-direct.com, 10.10.2007
- BOWERS, J.H., BAILEY, B.A., HEBBAR, P.K., SANOGO, S., LUMSDEN, R.D. (2001): The Impact of Plant diseases on World Chocolate Production.
Online. Plant Health Progress.www.plantmanagementnetwork.org. doi:10.1094/PHP-2001-0709-01-RV, 10.10.2007
- BRAVO, V.; HEDGER, J. (1987): Microflora associated with "witches'broom" in cocoa and it potential role in the biological control of the pathogen *Crinipellis perniciosa*.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo Dominican Republic, 17–23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.345-348

- BROWN, S.J., SCHNELL, J., MOTOMAYOR, J.C., LOPES, U., KUHN, D.H.; BORRONE, J.W. (2005): Resistance Gene Mapping for Witches' Broom Disease in *Theobroma cacao* L. in an F2 Population using SSR Markers and Candidate Genes.
Journal of the American Society for Horticultural Science. *130* (3): 366–337, 2005
- CABI Bioscience, UK Centre: Developing sustainable cocoa production systems- Briefing Paper
<http://www.cabi-commodities.org/Acc/ACCrc/ACCrcCOCbp.htm> , 15.01.2006
- CABI Commodities Bioscience (June, 2002): Global Research on Cocoa (GRO-Cocoa). GRO-Cocoa No. 1, June 2002. www.cabi.org/datapage.asp?iDocID=475, 10.12.2007
- CABI Commodities Bioscience (Dec. 2004): Global Research on Cocoa (GRO-Cocoa).
GRO-Cocoa No. 6, December 2004, www.cabi.org/datapage.asp?iDocID=475, 10.12.2007
- CAMUS, D. (2001): Resistance Genes Key to Protecting Chocolate Supply.
www.ars.usda.gov/is/pr/2001/011015.htm, 10.12.2007
- CATIE (1981): Genetic Resources of Cacao. A catalogue of the CATIE collection; Technical Bulletin No. 7, Turrialba, Costa Rica
- CATIE, 2002: Modernización de la Cacaocultura Orgánica del Alto Beni Bolivia.
Documento de Proyecto, CATIE, Turrialba Costa Rica. 68 p.
- CATIE. 2005. Modernización de la cacaocultura orgánica del Alto Beni, Bolivia: Informe Final. CATIE: Turrialba Costa Rica. 41p.
- CENTRAL DE COOPERATIVAS “EL CEIBO” LTDA. 1993: Memoria- Curso Técnico Cacao. Sapecho – Alto Beni gestión 1993
- CEPLAC, 1997. “Tecnologia da Ceplac recupera cacau”,
Agenda da Semana, 342, 14 de março, p. 1.
- CHOK, D. (1998): Cocoa Development & Its Environmental Dilemma
Smithsonian Migratory Bird Center/Smithsonian Tropical Research Institute . Panama City, Panama, 30 March 1998.
[www.http://nationalzoo.si.edu/ConservationsAndScience/MigratoryBirds/Research/Cacao/chok.cfm](http://nationalzoo.si.edu/ConservationsAndScience/MigratoryBirds/Research/Cacao/chok.cfm), 6.12.2007
- CIFUENTES, C.; MAYORGA, M.; PRIETO, E.; RONDON, G. y TOVAR, G (1981a): Estudio Cuantitativo de la Producción de Escobas en Plantas de Cacao, Afectadas por *Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer y su significado en el Manejo de la Enfermedad.
8th International Cocoa Conference, Proceedings, Cartagena, Colombia (S. 407–413)
- CIFUENTES, C.; MAYORGA, M.; PRIETO, E.; RONDON, G. y TOVAR, G. (1981b): Estudio de la infección y esporulación del *Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer, agente causal de la escoba de bruja del cacao en Guamal-Colombia.
8th International Cocoa Conference, Proceedings, Cartagena, Colombia, S. 485–492

- CIFUENTES, C.; PRIETO, E.; y TOVAR, G. (1981): Evaluación de Cuatro Fungicidas Sistémicos para el Control de *Crinipellis pernicioso* (STAHEL) Singer, en Guamal-Colombia.
8th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Cartagena, Colombia
- CUMAT-COTESU (1985): Capacidad de Uso Mayor de la Tierra. Proyecto Alto Beni. La Paz. Cooperación Técnica Suiza – COTESU, La Paz 1985
- EIMERN van /Häckel (1984): Wetter- und Klimakunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- ELBERS, J. (1991): Böden und Landnutzungsklassifikation am östlichen Andenrand im Kolonisationsgebiet Alto Beni – Bolivien, eine Luftbildunterstützte Analyse. Ruhr-Universität Bochum, unveröffentlichte Diplomarbeit an der Fak. 17 Geowissenschaften
- ELBERS, J. (2002): Agrarkolonisation im Alto Beni: Landschafts- und politisch-ökologische Entwicklungsforschung in einem Kolonisationsgebiet in den Tropen Boliviens. *In a u g u r a l – D i s s e r t a t i o n* zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- ENRIQUEZ, A.; SORIA, J.A. (1984:15): Mejoramiento genético para resistencia a cinco enfermedades del cacao. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Serie de Materiales de Enseñanza, CATIE No 9, Turrialba, Costa Rica.
- EVANS, H.C. (1980): Pleomorphism in *Crinipellis pernicioso*, causal agent of witches broom diseases of cocoa; British Mycological Society 74(3) 515–523, Great Britain
- EVANS, H.C. (1981): Witches Broom Disease – A Case Study;
Cocoa Growers Bulletin 32, December 1981; Cadbury Schweppes Ltda.; Bournville, Birmingham, England.
- EVANS, H.C. and BASTOS, C.N. (1980): Basidiospore germination as a means of assessing resistance to *Crinipellis pernicioso* (witches'broom disease) in cocoa cultivars.
The British Mycological Society 74(3) S. 525–536, Great Britain
- EVANS, H.C. & SOLORZANO, G. (1982): Witches' broom disease: wrong experiment, right results.
8th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Cartagena, Colombia, October, 1982, pp. 415–418
- FAOSTAT Agricultural Data. Datenbank der FAO
- FIBL (2002): Organic Coffee, Cocoa and Tea. Market, certification and production information for producers and international trading companies. Frick/Gräfelfing/Zurich, February 2002
- FRANKE, G. (1982): Nutzpflanzen der Tropen und Subtropen, Band I, S. Hirzel Verlag, Leipzig, 441 S.
- FONSECA, S.E.A. (1982): Epidemiologia de Vassoura de bruxa.
Informe Técnico 1981, Itabuna-Bahia-Brasil 1982, S. 306
- FONSECA, S.E.A.; ALMEIDA de, L.S. (1982): Control químico da vassoura da bruxa.
CEPEC Informe Técnico 1982, Itabuna-Bahia-Brasil, S. 321-323

- GARCÍA CÓRDOBA, J.; GEORGE, A.; ARGYLE, T.; TEN HOOPE, M.; KRAUSS, U. (2005): Existe la tolerancia genética del cacao (*Theobroma cacao*) a *Rosellinia bunodes* y *Rosellinia pepo*?
Manejo Integrado de Plagas y Agroforestería (Costa Rica), No. 75 p.21–31, 2005
- GOMES, A. (1979): Pesquisas Básicas sobre a “Vassoura de Bruxa” na Amazonia; CEPLAC, Itabuna
- GORENZ, A.M. (1972): Field spraying for control of *Phytophthora* pod rot.
In: WOOD (1973), *Cocoa*, Longman, London, S. 130
- GÖTSCH, E. (1994): Break-through in agriculture. Rio de Janeiro, ASPTA, 19 S.
- GÖTSCH, E. (1995): Externe Evaluierung des Regionalprogramms Alto Beni, Yucumo, Rurrenabaque. La Paz, DED (hektogr.), 9 S. (unveröffentlicht)
- PERES GRAMACHO, K.; VANDERLEI LOPES, U.; PIRES, J.L.; MONTEIRO LOPES, J.R.; BAHIA, C.; ZAIDAN, H.A. (2005): Phylogeography of the witches’ broom pathogen in Bahia.
In: 14th International Cocoa Research Conferenc p. 1325–1332. Proceedings, ACCRA, Ghana. Malaysia 2005
- GUTIERREZ, H. (1986): Informe Técnico sobre la situación de la producción cacaotera en la Central de Cooperativas “EL CEIBO” Ltda. (unveröffentlicht)
- HEDGER, J.N. (1987): Decomposition and basidiocarp production by witches'brooms of cocoa under field conditions in Ekuador.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers’ Alliance, S. 319-322
- HOFFMANN, G.M.; NIENHAUS, F.; SCHÖNBECK, F.; WELTZIEN, H.C.; WILBERT, H. (1985:233) : Lehrbuch der Phytomedizin. Paul Parey, Berlin und Hamburg.
- HOLMES, THOMAS, EVANS, PONELLA and AITKEN (2000): Comparison of Endophytic *Trichoderma* isolates and *T. stromaticum* for reduction of inoculum potential of *Crinipellis pernicious*.
CABI Bioscience, UK Centre. www.cabi-commodities.org
- ICCO Boletín Trimestral de Estadísticas del Cacao, Vol. XXVIII, No.2 año cacaotero 2001/02
- INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION; IICO Statistics 2003/04
- INC – INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZACION (1985): Proyecto de Desarrollo del Alto Beni La Paz, Bolivia 1985
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (1997): Indicadores sociodemográficos – Proyecciones de población, CD, INE, La Paz – Bolivia
- KRAUSS, U. and SOBERANIS, W. (2001): Rehabilitation of diseased cacao fields in Peru through shade regulation and timing of biocontrol measures.
Agroforestry Systems 53: 179–184, 2001. Kluwer Academic Publishers, Netherlands
- KRIEG, A.; FRANZ, J. (1989): Lehrbuch der biologischen Schädlingsbekämpfung. Berlin; Hamburg: Parey, 1989,
- LAKER, H.A.; SREENIVASAN, T.N. (1987): Recent investigations on chemical control of witches’ broom disease of cocoa in Trinidad.

- 10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.331-336
- LANAUD, C.; MOFAU, J.C; RISTERUCCI, M. (2001): Implications of new insight into the genetic structure of *Theobroma cacao* L. for breeding strategies.
In: Proceedings of the International Workshop on new technologies and cocoa breeding. INGENIC, London 2001, pp 89–107
- LANAUD, C; RISTERUCCI, M.; N'gorau, J.K.A.; KEBE, J.; PIERETTI, J. (2000): The cocoa genetic map, a tool to identify molecular markers for accelerating the breeding steps.
In: Memorias del Primer Congreso Venezolano del Cacao y su Industria. FUNDACITE Aragua 2000, pp 93–110.
- LAURA QUENTANA, W.; BENTES-GAMA, M.; SOMARRIBA, E.; PASTRANA, A. (2005): Adopción prospective de las innovaciones tecnológicas para la producción orgánica de cacao en el Alto Beni, Bolivia. *Agroforestería en las Américas* 43–44:32–37. CATIE. Turrialba, Costa Rica 2005
- MADDISON, A.C, (1993) In: RUDGARD, MADDISON & ANDEBRHAN (1993): Disease Management in Cocoa. Comparative epidemiology of witches' broom. Chapman & Hall 1993
- MARINO, W., Marschner, P. and Gasparotto, L. (2000) : Phosphate Solubilizing Bacteria from the Rhizosphere of *Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum. and *Bactris gasipaes* H.B.K.: Potential for Plant Growth Promotion.
In: Lieberei, R.; Bianchi, H.; Boehm, V.; Reisdorff, Ch. (2000). Proceedings of the German-Brazilian Workshop, Hamburg 2000, p.101
- MAYORGA P., M.; ARANZAZU H., F. (1981): Estudio sobre el Control Químico de la Escoba de Bruja del Cacao.
8th International Cocoa Research Conference, Cartagena-Colombia.
- MONTGOMERY, D. 2003. Diseño y análisis de experimentos. Trad. Rodolfo Piña García. Limusa Wiley México DF 686p.
- MILZ, J. (1993): Untersuchungen des Infektionszyklus von Hexenbesen (*Crinipellis pernicioso*) in Kakaopflanzungen im Kolonisationsgebiet Alto Beni – Bolivien. Technische Universität Berlin, Fachbereich 15. Diplomarbeit
- MILZ, JOACHIM (1997): Guía para el establecimiento de sistemas agroforestales en Alto Beni, Yucumo y Rurenabaque. La Paz, DED, 91 S.
- MILZ, J. (2002): Die Nutzung genetischer Vielfalt als Voraussetzung nachhaltigen Wirtschaftens in tropischen Waldökosystemen Lateinamerikas.
In: Brand, U., Kalsics, M. (Hrsg.): Wem gehört die Natur? Konflikte um genetische Ressourcen in Lateinamerika, Brandes&Aspel/Südwinde – Jahrbuch des österreichischen Lateinamerika Instituts – Österreich 2002, S.148-160
- MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT (1990): Compétitivité du cacao africain; analyse du marché mondial et des principaux producteurs. Secrétariat permanent des études, des évaluations et des statistiques (France)

- MIRANDA, M.; SOMARRIBA, E. (2005) : Evaluación agronómica de las plantaciones de cacao injertado de productores de la Central de Cooperativas EL CEIBO, Alto Beni, Bolivia.
Agroforestería en las Américas, 43–44:62–66. CATIE, Turrialba, Costa Rica 2005
- MUSE, R.B.; ISAAC, S.; COLLIN, H.A. (1987): Growth and nutritional requirements of *Crinipellis pernicios*.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.381-384
- MUSE, R.B.; ISAAC, S.; COLLIN, H.C. (1987): Phytotoxin production by *Crinipellis pernicios*.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S.355-358
- OKAISABOR, E.K. (1972:133): 'Control of Phytophthora pod rot disease by ground spraying'.
In: WOOD, G.A.R. (1975); Cocoa, Longman, London
- ORCHARD, J.E.; HARDWICK, K. (1987): Photosynthesis, carbohydrate translocation and metabolism of host and fungal tissues in cacao seedlings infected with *Crinipellis pernicios*.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 325-330
- OSTERROTH, M. (2002a): A Sucessão Cultural de Plantas Nativas e Cultivadas.
Agroecologia hoje anoIII/15, Julho/Agosto 2002:15–19
- OSTERROTH, M. (2002b): Implantação de Agroflorestas.
Agroecologia hoje anoIII/15, Julho/Agosto 2002:8–11
- PEREIRA, L.; de Almeida and Santos (1996): Witches' broom disease of cocoa in Bahia: attempts at eradication and containment:
Crop Protection Vol. 15. No. 8. pp. 743–752; 1996 Elsevier Science Ltd
- PEREIRA, L. (2000): Perspecticas para el control de las enfermedades del cacao. Memorias del Primer Congreso Venezolano del Cacao y su Indústria. FUNDACITE Aragua 2000; pp 93–110.
- Pesticide Action Network UK (2001): Sustainable cocoa production systems.
Pest Management Notes No 12, PMN No 12 (2001). www.pan-uk.org/Internat/IPMinDC/pmn12.pdf, 15.12.2006
- PLOETZ, R.C. (2007): Diseases of tropical Perennial Crops: Challenging Problems in Diverse Environments.
Plant Disease, 91 No.6. p 644-663; The American Phytopathological Society 2007
- PORRAS, V.H.; SANCHEZ, J.H. (1991:17): Enfermedades del Cacao.
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, Fasciculo No.5, La Lima, Cortés – Honduras
- QUEIROZ, C.T.; GUIMARAES, C.T.; ANHERT, D.; SCHUSTER, I.; DAHER, R.T.; PEREIRA, M.G.; MIRANDA, V.R.M.; LOGUERCIO, L.L.; BARROS, E.G. and MOREIR, M.A.(2003): Identification of a major QTL in cocoa (*Theobroma cacao* L.) associated with resistance to witches' broom disease.
Plant Breeding, Vol. 122, No 3 p 268

- RAO, M.R.; NAIR, P.K.R. and ONG, C.K. (1998): Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 38: p 3–50, 1998. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- REHM, S. (1989): Handbuch der Landwirtschaft und Ernährung in den Entwicklungsländern, Band 4. Spezieller Pflanzenbau in den Tropen und Subtropen, Ulmer Verlag, Stuttgart, 653 S.
- ROCHA, H.M.; WHEELER, B. (1985): Factors influencing the production of basidiocarps and the deposition and germination of basidiospores of *Crinipellis perniciosus*, the causal fungus of witches' broom on cocoa (*Theobroma cacao*). *Plant Pathology* 34, p 319–328
- Rocha, H.M.; Miranda, R.A.C.; Sgrillo, R.B. & Setubal, R.A. (1993): Witches' Broom in Bahia, Brazil. In: RUDGARD, MADDISON & ANDEBRHAN (1993): Disease Management in Cocoa. Comparative epidemiology of witches' broom. Chapman & Hall 1993
- RUDGARD S.A.; ANDEBRHAN, T. (1987): Predicting the cost/benefits of sanitation pruning for the management of witches' broom disease. 10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 341-344
- RUDGARD, MADDISON & ANDEBRHAN (1993): Disease Management in Cocoa. Comparative epidemiology of witches' broom. Chapman & Hall 1993
- RUF, F. & ZADI, H. (1998): Cocoa: From Deforestation to Reforestation. Migratory Bird Center. www.nationalzoo.si.edu/ConservationAndScience/MigratoryBirds/Research/Cacao/ruf.cfm, 7.9.2006
- RUIZ, P.O. (1993): El rol de las micorrizas en pijuayo (*Bactris gasipaes* H.B.K.). Universidad de Carolina del Norte, EEUU Estación Experimental "San Ramón", Yurimaguas, Perú
- SANTOS dos, M.M.; SCERNE e, A.O., SANTOS da, S. (1980): Observacoes fenológicas em cacaueiros. CEPEC Informe Técnico, Itabuna – Bahia – Brasil 1982
- SAS (2004) Documentation for SAS, Version 8, <http://v8doc.sas.com/sashtml>, 10.6.2007
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H.-P.; HARTGE, K.-H. und SCHWERTMANN, U., (1984). Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Enke, 1984, 442 S.
- SCHMIDT, R.A., RUDGARD, S.A, MADDISON A.C & ANDEBRHAN(1993): Comparative Epidemiology of the witches' broom pathosystem. In: RUDGARD, MADDISON & ANDEBRHAN (1993:130–135; 145): Disease Management in Cocoa. Comparative epidemiology of witches' broom. Chapman & Hall 1993
- SCHROTH, G.; KRAM, U.; GASPAROTTO, L.; DUARTE AGUILAR, J.A. and VOHLAND, K. (2000): Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropic. *Agroforestry Systems* 50 No.3:199–241, 2000
- SCHULZ, B. (1994): Ökologischer Landbau im Südosten Brasiliens. Der Tropenlandwirt, Beiheft Nr. 51, Witzhausen, Selbstverlag des Verbandes der Tropenlandwirte, 200 S.

- SCHULZ, B.; BECKER, B. and GOTSCH, E. (1994): Indigenous knowledge in a 'modern' sustainable agroforestry system — a case study from eastern Brazil.
Agroforestry Systems 23: 59–69, 1994. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- SILVA, H.M. (1981): Efeito de Fungicidas no Controle da Vassoura-de-bruxa em Frutos de Cacaoeiros;
In: CEPEC Informe Técnico 1981, Itabuna-Bahia-Brasil 1982, S. 312–317
- SOMARRIBA, E.; TRUJILLO, L.; STOIAN, D.; PALENCIA, G.; CANCARI, F.; TRUJILLO, G.; CUAQUIRA, J.; MENDIETA, V.; AGUIRRE, F.; JULY, W.; HUANCA, E.; MAMANI, J.; FLORES, R.; CASTRO, G. (2005): Cómo modernizar la cadena del cacao del Alto Beni, Bolivia?
Agroforestería en las Américas 43-44: 15-19, CATIE, Turrialba Costa Rica 2005
- SOMARRIBA, E.; TRUJILLO, L. (2005): El proyecto Modernización de la cacaocultura del Alto Beni, Bolivia.
Agroforestería en las Américas 43/44: 6–13. CATIE, Turrialba Costa 2005
- SREENIVASAN, T.N.; DABYDEEN, S. (1989): Modes of Penetration of Young Cocoa Leaves by *Crinipellis perniciosas*.
Plant Disease 73, No.6, S. 478–481
- STEEL, TORRIE & DICKEY. 1997. Principles and procedures of statistics a biometrical approach. McGraw-Hill USA. p 666.
- SURUJDEO-MAHARAJ, S. & UMAHARAN, P. (2004): Assessment of Resistance to Withes'-Broom diseases in Clonal and Segregating Populations of *Theobroma cacao*.
Plant Disease, August 2004: 797–803. The American Phytopathological Society 2004
- THOMPSON, W.; ISAAC, S.; COLLIN, H.A.; HARDWICK, K. (1987): Release of protoplasts from *Crinipellis perniciosa*.
10th International Cocoa Research Conference, Proceedings, Santo Domingo, Dominican Republic, 17-23 May 1987. London, UK, Cocoa Producers' Alliance, S. 349-353
- THOROLD, C.A. (1975): Diseases of cocoa. Clarendon Press. Oxford
- TOXOPEUS, H.; LEMS, G. (1989): Kakao. REHM, S.: Handbuch der Landwirtschaft und Ernährung in den Entwicklungsländern Band 4, Spezieller Pflanzenbau in den Tropen und Subtropen, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- TRUJILLO, G. (2007): Estudio de Evaluación de clones foráneos, selección y caracterización de plantas superiores de cacao. PIAF – EL CEIBO. El Alto – La Paz, Bolivia 2007, 93 S.
- WALTER, H. u. BRECKLE, S.-W. (1991): Ökologie der Erde. Band 1: Grundlagen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- WALTER, H. u. BRECKLE, S.-W. (2004): Ökologie der Erde. Band 2: Spezielle Ökologie der Tropischen und Subtropischen Zonen. Gustav Fische Verlag, Stuttgart
- WHEELER, B.E.J. (1985): Witches' broom disease (*Crinipellis perniciosa*) of cocoa and its quarantine significance.
Proceedings of the Regional Conference on Plant Quarantine Support for Agricultural Development, December 1985. ASEAN Plant Quarantine & Training Institute, Selangor, Malaysia, S. 13–18.

- WHEELER, B.E.J. (1987): Plant pathology in a developing world. British Society for Plant Pathology Presidential Address 1986.
Plant Pathology 36, 430–437
- WHEELER, B.E.J. and MEPSTED, R. (1981): Pathogenic Races of *Crinipellis pernicios*.
8th International Cocoa Research Conference, Proceedings Cartagena, Colombia
- WHEELER, B.E.J. and MEPSTED, R. (1988): Pathogenic variability amongst isolates of *Crinipellis pernicios* from cocoa (*Theobroma cacao*).
Plant Pathology 37, 4 S. 475–488, UK
- WHINNEY, J. (1998): Considerations for the Sustainable Production of Cocoa.
Smithsonian Migratory Bird Center/Smithsonian Tropical Research Institute. Panama City, Panama, 30 March 1998
- WOOD, G.A.R. (1973) : Cocoa, Longman, London, 292 S.
- YOUNG, A. (1993): Agroforestry as a viable alternative for soil conservation.
entwicklung + ländlicher Raum 5/93, S. 3–7
- YOUNG, A. (1997): Agroforestry for soil management. 2. Auflage (von YOUNG 1989), Wallingford, CAB International, 320 S.
- ZEBALLOS, H. & TERRAZAS, E. (1970): El Cultivo del Cacao en la Zona Alto Beni La Paz, BO, Instituto Nacional de Colonización 57p. (Boletín de Divulgación Técnica No. 1)
- ZUNDEL, Ch.; KILCHER, L.; MÄDER, P.; SCHNEIDER, M.; GARIBAY, S. (2007): What is the contribution of organic agriculture to sustainable development? Long-term farming systems comparisons in the tropics. Final Proposal. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick, Switzerland, March 2007
- ZOLLNER, S. (1991) : Wassererosion und Bodenkonservierende Maßnahmen in den Tropen und Subtropen;
Technische Universität Berlin, unveröffentlichte Diplomarbeit am Fachbereich Landschaftsentwicklung, Institut für Ökologie, Fachgebiet Regionale Bodenkunde

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorgelegte Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst und andere als die angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Lauterbach, den 26. April 2006

Joachim Milz